

明治大学大学院 理工学研究科

2014 年度

博士学位請求論文

研削下で生じるファイアボール形状と  
機械材料との関係

**Relationship between fireball's shapes and  
mechanical materials under grinding**

学位請求者

田 邊 實

---

# 目 次

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 第1章 緒 言                       | 1  |
| 1.1 背景                        | 1  |
| 1.2 従来の研究の概要                  | 2  |
| 1.3 本研究の目的と意義                 | 3  |
| 1.4 本論文の構成                    | 3  |
| 第2章 高速度CCDカメラを用いた火花の特性把握と鋼種判別 | 5  |
| 2.1 はじめに                      | 5  |
| 2.2 JISによる鋼の火花試験法の概略          | 5  |
| 2.2.1 火花の形及び名称                | 5  |
| 2.2.2 鋼種推定基準                  | 6  |
| 2.3 火花試験方法                    | 14 |
| 2.4 実験に用いた標準試験品               | 17 |
| 2.5 実験結果                      | 19 |
| 2.5.1 火花画像の特性                 | 19 |
| 2.5.2 炭素鋼の火花形状                | 24 |
| 2.5.3 合金鋼の火花形状                | 25 |
| 2.5.4 火花の任意断面通過流線の数           | 27 |
| 2.5.5 火花流線の色                  | 33 |
| 2.6 おわりに                      | 34 |
| 第3章 ファイアボール形状と機械材料との関係        | 35 |
| 3.1 はじめに                      | 35 |
| 3.2 実験装置及び方法                  | 35 |
| 3.3 炭素鋼並びに合金鋼のファイアボール形状と特徴    | 38 |
| 3.3.1 火花発生メカニズム               | 38 |
| 3.3.2 材料の物性値について              | 39 |
| 3.4 ファイアボールについて               | 43 |
| 3.4.1 炭素鋼のファイアボールとその特徴        | 45 |
| 3.4.2 合金鋼のファイアボールとその特徴        | 48 |
| 3.4.3 工具鋼のファイアボールとその特徴        | 55 |
| 3.5 おわりに                      | 60 |

---

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 第4章 研削点温度に関する実験                    | 61 |
| 4.1 はじめに                           | 61 |
| 4.2 実験装置及び方法                       | 61 |
| 4.3 巻き付けノズルによる研削点への油剤供給状態          | 65 |
| 4.4 実験結果と考察                        | 67 |
| 4.4.1 一般砥石研削における研削点温度              | 67 |
| 4.4.2 CBN ホイール研削における研削点温度          | 69 |
| 4.4.3 一般砥石と CBN ホイールにおける研削点温度の比較   | 70 |
| 4.4.4 ホイール周速度に対する研削点温度             | 70 |
| 4.4.5 研削量に対する研削抵抗及び研削点温度の影響        | 71 |
| 4.4.6 研削油剤の種類に対する CBN ホイール研削の研削点温度 | 72 |
| 4.4.7 研削油剤供給法が研削点温度に及ぼす影響          | 73 |
| 4.5 おわりに                           | 74 |
| 第5章 ファイアボールによる鋼種推定手順               | 75 |
| 5.1 はじめに                           | 75 |
| 5.2 ファイアボールの特性を利用した鋼種推定手順          | 75 |
| 5.3 おわりに                           | 79 |
| 第6章 結 言                            | 80 |
| 謝辞                                 | 83 |
| 参考文献                               | 83 |
| 関連発表論文                             | 85 |

# 第1章 緒 言

## 1.1 背景

人間は原始時代より二足歩行により火と道具を使って生活してきた。石器時代には石や木などの素材を利用し、紀元前 1400 年頃には、鉄が道具として使い始められ、鉄器、武器、農器具、包丁、鋏などに使用し現在までに至っている。

「鉄」という言葉は日常的にもよく使われ、ことわざまでになっており、「鉄は熱いうちに打て」、「鉄板焼き」、「鉄筋コンクリート」など頻繁に耳にするほど生活に密着して使われている。鉄そのものは柔らかいため、炭素などの元素を添加して使用されているが、厳密には純粋な鉄すなわち純鉄とそれ以外の鉄すなわち鉄鋼または鋼とに区別されて使い分けされている。

一言で鉄鋼と言っても数多くの種類が存在している。例えば鉄に加える炭素の割合、元素の分量と種類、焼入れ、焼き戻し、焼きならし、焼きなましなどの熱処理の有無など、多くの種類の鉄鋼材料（以後、単に鋼材と呼ぶ）が製作・提供されている。近年では精錬加工技術、熱処理技術の向上により広範な用途、加工条件など種々の目的に対応した鋼材及び新しい鋼材が続々と開発されている。これら多くの種類の鋼材は広範な用途や目的に合わせて、船舶、輸送車両、建築構造物、橋梁、日常生活用品などに使用されているが、その用途、要求される性質、性能などによって最適な鋼材を選択する必要がある。また設計技術者、機械技術者は環境面、コストダウン、省力化などの条件のもとで、適切な材料を選択するために材料の特性を熟知しておく必要がある。最近では安価な海外からの輸入材料を使用する機会が増加しており、所定の材料仕様であるかを確認する業務が増加している。

一方、鋼材は外観上識別を付けにくく、判別は目視では難しい。設計段階で最適な材質を選択したにもかかわらず、異材のため強度不足などにより破損したり、異材使用が原因で車両事故、化学プラント、工場などでの大事故に至ったりした例も数多くある。そのため異材の混入防止及び誤選択防止のため材料の鑑別が重要となる。炭素含有量、添加元素などの種類により発生する火花は特徴ある形状を示すことから、迅速かつ的確に材料の判別をする方法として JIS 規格に「鋼の火花試験法(Method of Spark Test for Steels)[JIS G 0566]」が規定されている。この試験はグラインダで火花を発生させ、その火花の形状・色・数などから鋼種の推定、または異材混入の鑑別を目的としている。

しかしながら、この方法は鑑別する人間の習熟度と技能に依存するため、3～

5年の経験と熟練を要するといわれている。さらに熟練者の高齢に伴う退職による人手不足が深刻になってきているため、未経験の技術者にも容易に鋼材を鑑別できる方法が要求されている。鋼材の鑑別を行う方法を検討することは工学上重要な課題でもある。

## 1.2 従来の研究の概要

鋼種鑑別法については、従来から化学成分分析、スペクトル分析などがある。また試験材料を粉末にして縦型の電気炉を通して酸化燃焼による火花発生とブレンザーによる微粉燃焼火花法を用いた鑑別法<sup>(1)</sup>が発表されているが、人手と手間がかかるため、手軽さと迅速さにおいては、研磨機を用いた火花試験すなわちグライнда試験に勝るものはないとしている<sup>(1)</sup>。

桶谷は三島，三橋，鐵と鋼 28(1942)117, 959 を引用し，従来の火花試験の研究は次のように大別できるとして文献を紹介している。

- 1) 鋼材の火花の工学的研究
  - 2) 火花の物理的研究
  - 3) その他，火花を出さない合金(若干)
- 1) 鋼材の火花の工学的研究について

1804年頃から行われ，火花の形態，色，ペレットの研究などがあり，M.Berman (1909)，O.Thallner(1909)，E.Pitois(1924)，G.M.Enos(1927)，野田一六 (1936)などの研究者を紹介している。

- 2) 火花の物理的研究について

寺田虎彦，中谷宇吉郎の研究にはじまり，中谷宇吉郎(1934)，G.Tammann，W.Boehme(1934)などの研究者が紹介されている。

このように鋼材の鑑別法として上記に述べたいくつかの方法が提案され，実施されてきている。

文献を調査した限りでは，上記の年代に関連した研究が数多く発表されているが，JIS規格の制定に力が注がれ，1966年にJIS規格が制定されてからは目立った論文は発表されていないようである。

その後，このJIS規格が1980年に見直されてそのまま現在に至っている理由として，長年にわたり火花の形態，色，ペレットなどの観察データが数多く集大成され，試験方法が，現場で定着してきているものと考えられる。

### 1.3 本研究の目的と意義

本研究は鋼材の判別について現在でも難しい JIS G 0566 の「鋼の火花試験法」<sup>②</sup>を未熟練者でも容易に鑑別しやすくするために高速度 CCD カメラとパーソナルコンピュータを利用して画像を分析し、熟練者の肉眼観察に匹敵する鑑別法の確立を目的としている。さらに研削切りくずの中で熔融して球状になったファイアボールを走査型電子顕微鏡 SEM(Scanning Electron Microscope)で観察し、機械材料の違いによるファイアボールの形状変化を明らかにし、さらに含まれる元素の性質との関係も明らかにすることを目的としている。

誰でも簡単に鋼種鑑別ができれば、人身事故に至る大事故は未然に防ぐことができるため、熟練者不足から生じる安全対策上の問題も払拭される。

### 1.4 本論文の構成

本論文では JIS に規定されている火花試験方法に比べて、鋼材の判別を未熟練者でも容易に鑑別しやすくするために高速度 CCD カメラとパーソナルコンピュータを利用して画像を分析し、熟練者の肉眼観察に匹敵する鑑別法を明らかにしている。さらに研削切りくずの中で熔融して球状になったファイアボールを SEM で観察し、機械材料の違いによるファイアボールの形状変化並びに、含まれる元素の性質との関係を明らかにしている。ファイアボールの定性的な変化から材料鑑別が可能になり、従来の JIS の方法と組合せることにより、より確度の高い鋼材の鑑別が可能であるとしている。

第1章では、研究の背景、従来の研究の概要、本研究の目的および意義、論文の構成について述べている。

第2章では、高速度 CCD カメラを用いた火花画像をパーソナルコンピュータで画像解析し、火花流線の時系列画像を合成することにより肉眼による火花流線を再現し、火花の破裂状態及び破裂回数について述べている。

また炭素鋼では計測ライン上を通過する火花流線の強度、個数をカウントし、炭素含有量が増加するに従い増大することを見出し、この特性を用いて鋼種判別に利用できることを述べている。JIS G 0566 で規定されている鋼の火花試験について、専門の熟練者が簡単にはできないような鋼種判別を未熟練技術者でもできる高速度 CCD カメラを使用し、研削火花の形状を用いて鋼材を判別するための方法を提案している。短時間に連続撮影した研削火花画像をコンピュータで解析し、最適な画像の重ね合わせにより、熟練者が肉眼で観察して鑑定したも

のとまったく同じ火花流線を再現する効果を見出している。

第3章では、研削下で生じるファイアボール形状と機械材料の関係について、JISによる火花試験方法だけでなく、研削して生じる切りくずの中で熔融して表面張力により球状になったファイアボールをSEM観察し、機械材料の違いによるファイアボールの形状変化を明らかにし、さらに含まれる元素の性質との関係を検討している。ファイアボールの定性的な変化から材料鑑別が可能になり、従来の方法と組み合わせることにより、より詳細な鋼種鑑別ができることを明らかにしている。

第4章では、ファイアボールを生成する条件を推定するために、研削点温度を測定した結果を示している。研削加工では、負のすくい角によって高速で材料除去するため、研削点温度が高くなり、火花が発生する。研削点温度を測定することによりファイアボールの形成状態の推定検証を行なっている。研削条件によって研削点温度に大きな相違が生じていることを明らかにしている。また研削加工は製品の最終仕上げ加工として位置づけされているが、超砥粒として注目されているCBN砥粒が、一般砥粒に比べて研削性能の良い理由を研削点温度の立場から提言している。このCBN砥粒は鋭利な切れ刃状態を長く持続しており、ファイアボールの生成には低すぎる研削点温度であるため、火花試験には不適であることを明らかにしている。

第5章では、鋼種推定手順を提言している。

第6章では、まとめとして、今まで専門の熟練者に依存していたJISによる鋼種鑑別方法について、火花画像測定システムにより未熟練者による鑑別が容易になる方法をまとめている。またファイアボールのSEM観察から得られた材料の含有元素による特徴の違いから、鋼種鑑別の可能性をまとめている。

## 第2章 高速度 CCD カメラを用いた火花の特性

### 把握と鋼種判別

#### 2.1 はじめに

JIS で規定されている鋼種鑑別法で材種の火花判定を行うには、火花の発生状態が、材質、砥石の種類、研削条件など種々の条件で変化し、かつ動的な火花を肉眼で判別するため、長年の熟練を必要とする。

本章では、グラインダを用いた研削火花測定システムにより研削火花を高速度 CCD カメラで撮影し、撮影画像を解析することにより、未熟練者でも簡単に判定可能な材種鑑別システムを構築することを目的として、火花画像の特性を検討している。

#### 2.2 JIS による鋼の火花試験法の概略

試験は鋼種の推定又は異材の鑑別を目的とし、鋼種試験品の火花試験方法にしたがって実施する際に、試験器具としてグラインダ、砥石、補助器具を用い、常に同一試験条件とするように定めている。

##### 2.2.1 火花の形及び名称

火花の形及び名称を図 2.1 に示す。

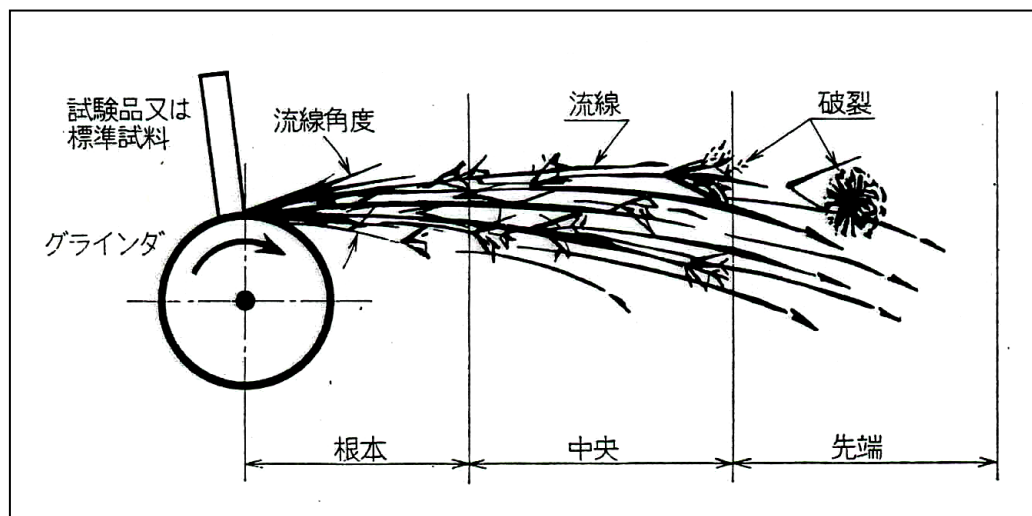


図 2.1 火花の形及び名称 (JIS G 0566-1980)



試験品をグラインダに押しつける圧力はできる限り一定で、S20C 程度の鋼で火花の長さが、500mm 程度になるように定められている。

火花は、根本(研削位置から 150 mm)、中央(150mm～300mm)、先端(300mm～500mm)に分けて、火花の特性を次の項目について観察する。

- (1) 流線 (色, 明るさ, 長さ, 太さ, 数)
- (2) 破裂 (形, 大きさ, 数, 花粉)
- (3) 手ごたえ

















## 2.2.2 鋼種推定基準

火花特性及び火花スケッチ例を参考に、標準試験品との比較から鋼種を推定する。

### (1) 炭素鋼の火花特性及び火花スケッチ例

表 2.1 に炭素鋼の火花特性表を、図 2.2 に炭素鋼の火花の特徴をそれぞれ示す。図 2.3～図 2.7 に主な炭素鋼のスケッチ例を参考に示しておく。

表 2.1 炭素鋼の火花特性表 (JISG0566-1980)

| C %           | 流 線  |   |   |   |   | 破 裂          |   |   |   | 手ごたえ  |  |  |  |  |  |
|---------------|--|---|---|---|---|--------------|---|---|---|---|--|--|--|--|--|
|               | 色  | 明るさ   | 長 さ   | 太 さ   | 数   | 形            | 大きさ   | 数   | 花 粉   |   |  |  |  |  |  |
| 0.05<br>未 満   | だいたい色<br> | 暗 い   | 長 い   | 太 い   | 少ない   | 破裂なし(*)      |   |   |   | 軟らかい<br> |  |  |  |  |  |
| 0.05          |  |  |  |  |  | 2本破裂         | 小さい   | 少ない   | な し   |   |  |  |  |  |  |
| 0.1           |  |   |   |   |   | 3本破裂         |   |  | な し   |   |  |  |  |  |  |
| 0.15          |  |   |   |   |   | 数本破裂         |   |   | な し   |   |  |  |  |  |  |
| 0.2           |  |   |   |   |   | 3本破裂<br>2段咲き |   |   | な し   |   |  |  |  |  |  |
| 0.3           |  |   |   |   |   | 数本破裂<br>2段咲き |   |   | つき始<br>める   |   |  |  |  |  |  |
| 0.4           |  |   |   |   |   | 数本破裂<br>3段咲き |   |   | あ り   |   |  |  |  |  |  |
| 0.5           | 明 る い  | 長 い   | 太 い   |  |  | 大 き い        |  |  |   |   |  |  |  |  |  |
| 0.6           |           |  |  |   |   |              |   |   |  |   |  |  |  |  |  |
| 0.7           |  |   |   |   |   |              |   |   |   |   |  |  |  |  |  |
| 0.8           |  |   |   |   |   |              |   |   |   |   |  |  |  |  |  |
| 0.8<br>を 超 える | 赤 色  | 暗 い   | 短 い   | 細 い   | 多 い   | 複 雑          | 小 さい  | 多 い   | 多 い   | 硬 い   |  |  |  |  |  |

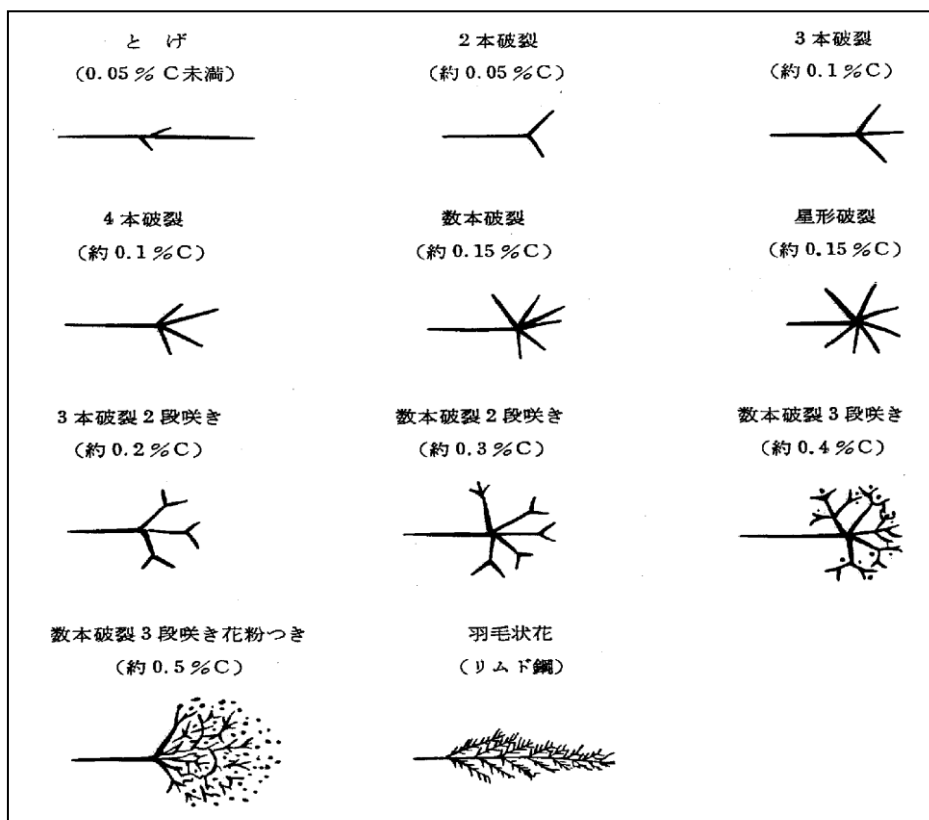


図 2.2 炭素鋼の火花の特徴 (JIS G 0566-1980)

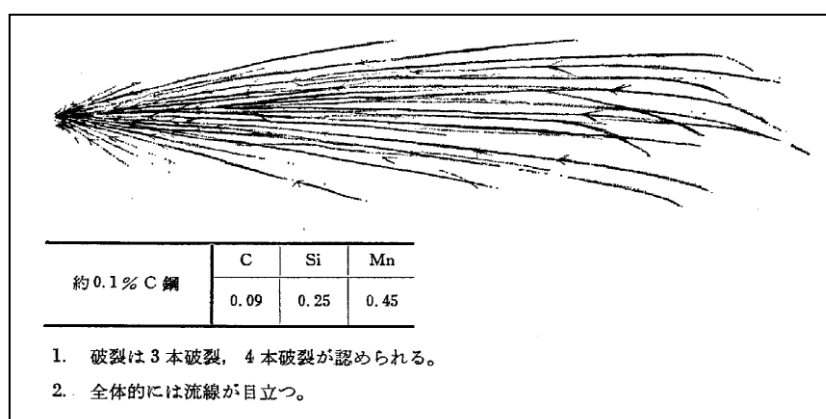


図 2.3 0.1%炭素鋼 (S10C) の火花スケッチ例(JIS G 0566-1980)

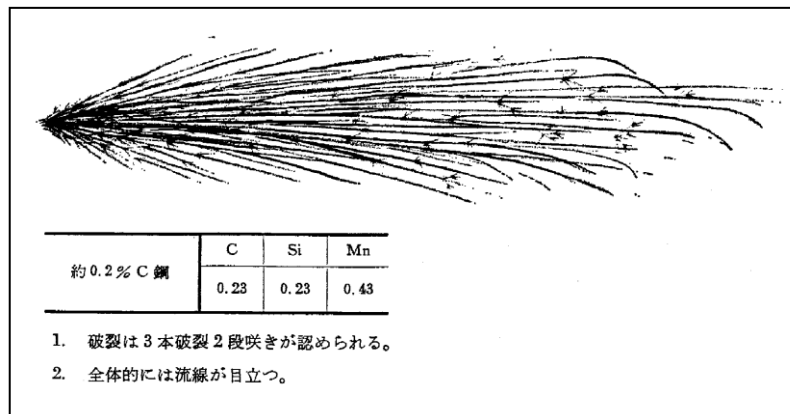


図 2.4 0.2%炭素鋼 (S20C) の火花スケッチ例(JIS G 0566-1980)

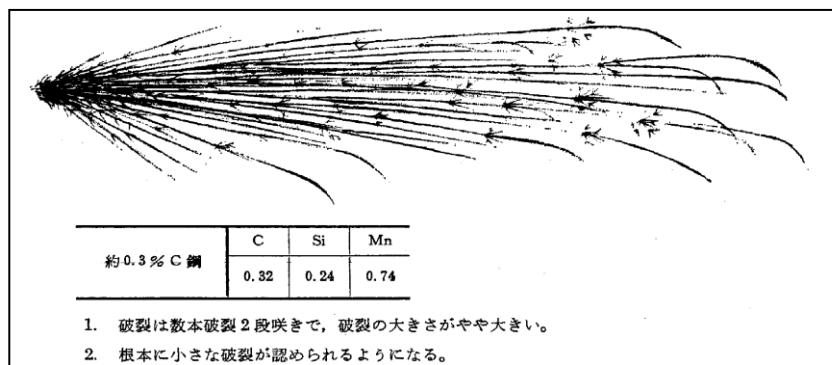


図 2.5 0.3%炭素鋼 (S30C) の火花スケッチ例(JIS G 0566-1980)

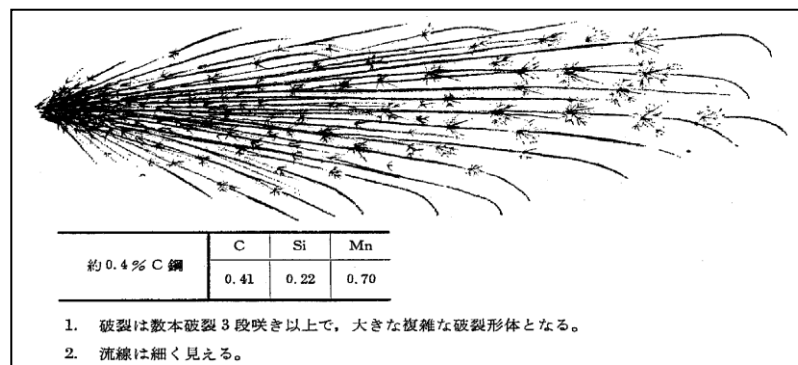


図 2.6 0.4%炭素鋼 (S40C) の火花スケッチ例(JIS G 0566-1980)

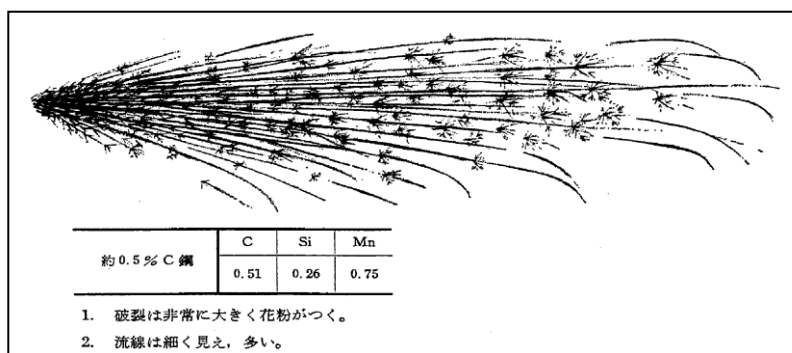


図 2.7 0.5%炭素鋼 (S50C) の火花スケッチ例(JIS G 0566-1980)

炭素鋼の火花スケッチ例から、炭素含有量の少ない場合には、破裂が少ないが、炭素含有量の増加にしたがって破裂の数が増加し、破裂の仕方も2段咲き、3段咲きと複雑となることが認められる。未熟練技術者でも火花の流線を捉えることができれば、比較的簡単に判別可能であると考えられる。

## (2) 合金鋼の火花特性及び火花スケッチ例

表 2.2 に合金鋼の火花特性表を、図 2.8 に合金鋼の火花の特徴を示す。合金鋼に含まれる元素特有の火花が特徴づけられている。図 2.9～図 2.19 に主な合金鋼及び工具鋼のスケッチ例を示す。

表 2.2 火花特性に及ぼす合金元素の影響 (JIS G 0566-1980)

| 影響大別   | 合金元素 | 流 線      |     |    |          | 破 裂      |           |       |    | 手ごたえ | 特 徴    |    |
|--------|------|----------|-----|----|----------|----------|-----------|-------|----|------|--------|----|
|        |      | 色        | 明るさ | 長さ | 太さ       | 色        | 形         | 数     | 花粉 |      | 形      | 位置 |
| 炭素破裂助長 | Mn   | 黄みの白色    | 明るい | 短い | 太い       | 白色       | 複雑、細かい樹枝状 | 多い    | あり | 軟らかい | 花粉     | 中央 |
|        | Cr   | だいたい色    | 暗い  | 短い | 細い       | だいたい色    | 菊状花       | 変わらない | あり | 硬い   | 花      | 先端 |
|        | V    | 変化少ない    |     |    |          | 変化少ない    | 細かい       | 多い    | —  | —    | —      | —  |
| 炭素破裂阻止 | W    | 暗い赤色     | 暗い  | 短い | 細い、波状と断続 | 赤色       | 小滴、きつねの尾  | 少ない   | なし | 硬い   | きつねの尾  | 先端 |
|        | Si   | 黄色       | 暗い  | 短い | 太い       | 白色       | 白玉        | 少ない   | なし | —    | 白玉     | 中央 |
|        | Ni   | 赤みの黄色    | 暗い  | 短い | 細い       | 赤みの黄色    | ふくれせん光    | 少ない   | なし | 硬い   | ふくれせん光 | 中央 |
|        | Mo   | 赤みのだいたい色 | 暗い  | 短い | 細い       | 赤みのだいたい色 | やり先       | 少ない   | なし | 硬い   | やり先    | 先端 |

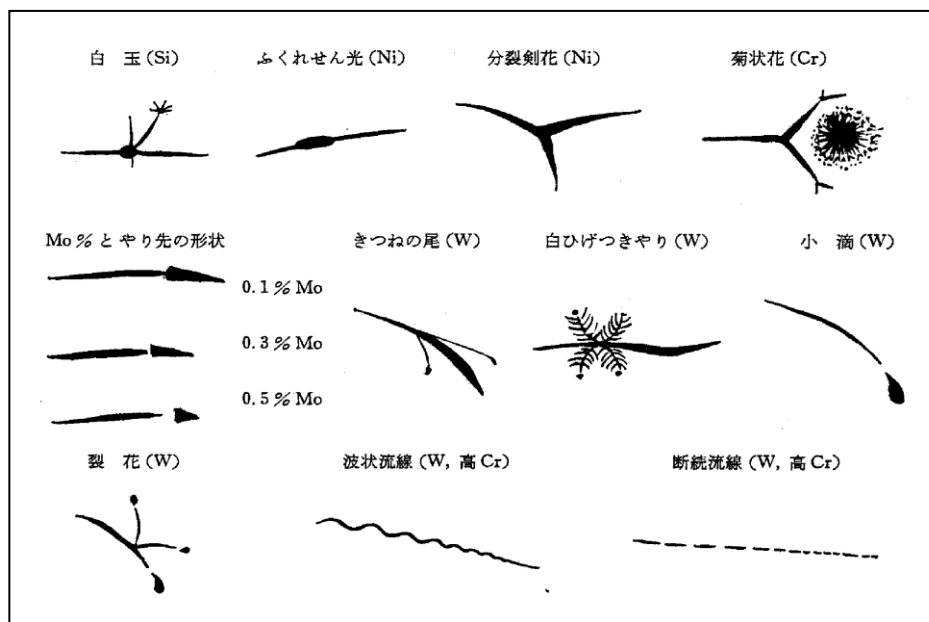


図 2.8 合金元素による火花の特徴 (JIS G 0566-1980)

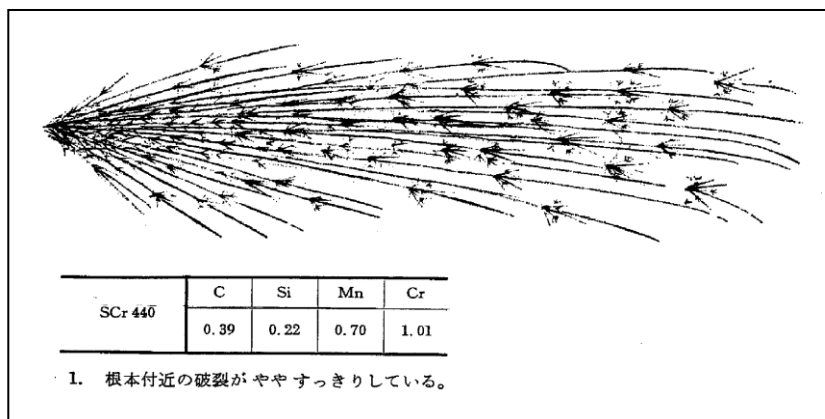


図 2.9 SCr 440 の火花スケッチ例(JIS G 0566-1980)

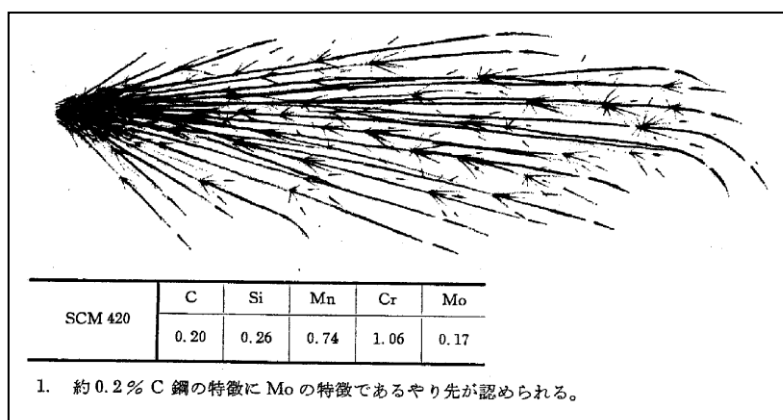


図 2.10 SCM420 の火花スケッチ例(JIS G 0566-1980)

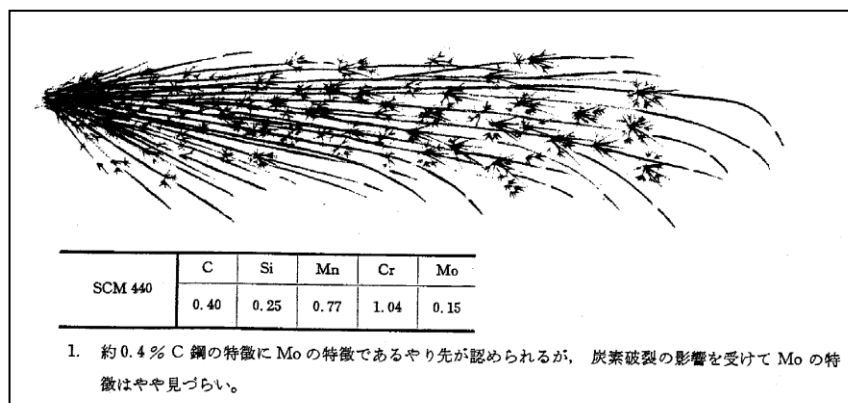


図 2.11 SCM440 の火花スケッチ例(JIS G 0566-1980)

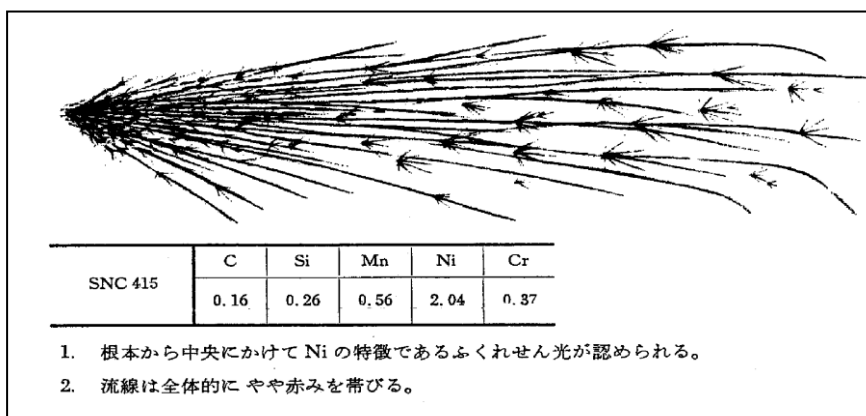


図 2.12 SNC415 の火花スケッチ例(JIS G 0566-1980)

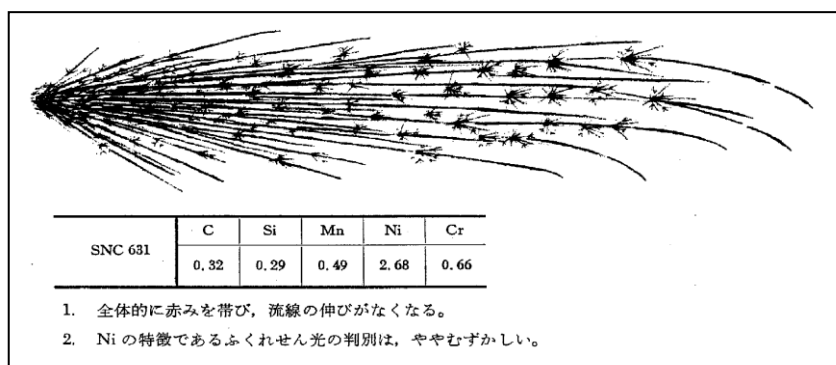


図 2.13 SNC631 の火花スケッチ例(JIS G 0566-1980)

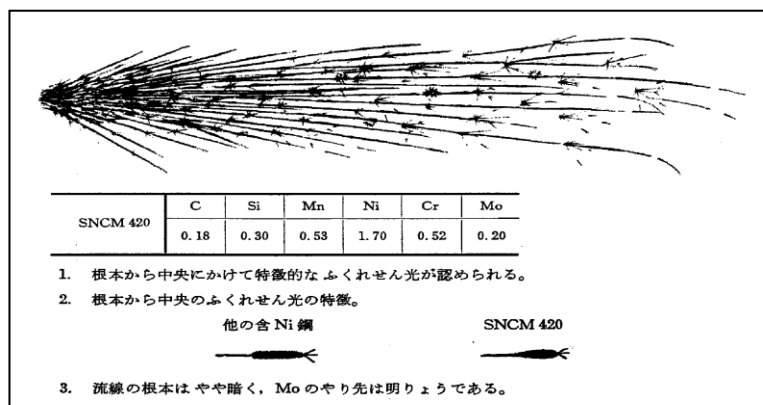


図 2.14 SNCM420 の火花スケッチ例(JIS G 0566-1980)

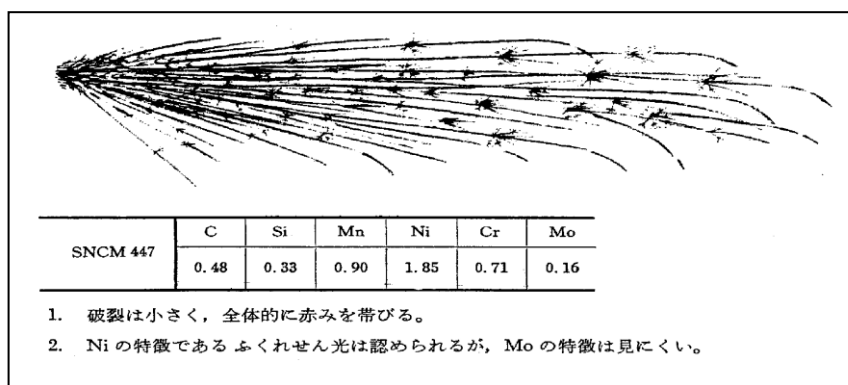


図 2.15 SNCM447 の火花スケッチ例(JIS G 0566-1980)

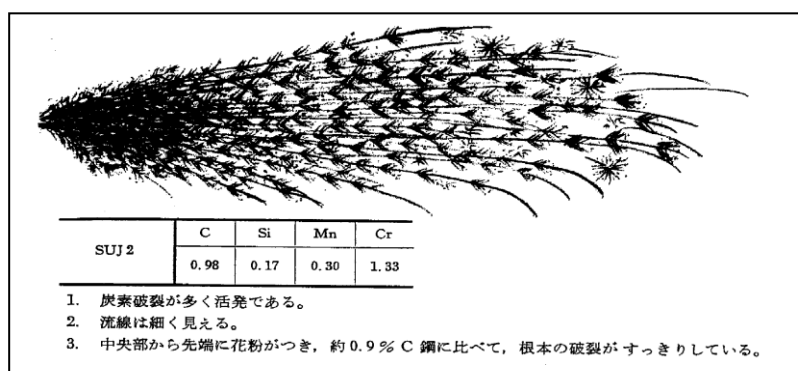


図 2.16 SUJ2 の火花スケッチ例(JIS G 0566-1980)

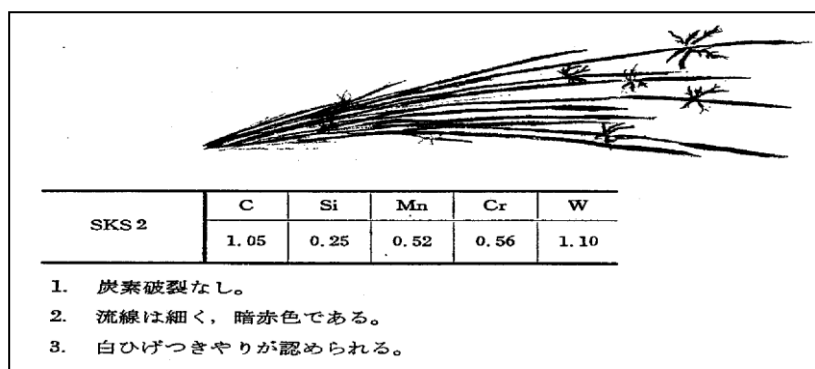


図 2.17 SKS2 の火花スケッチ例(JIS G 0566-1980)

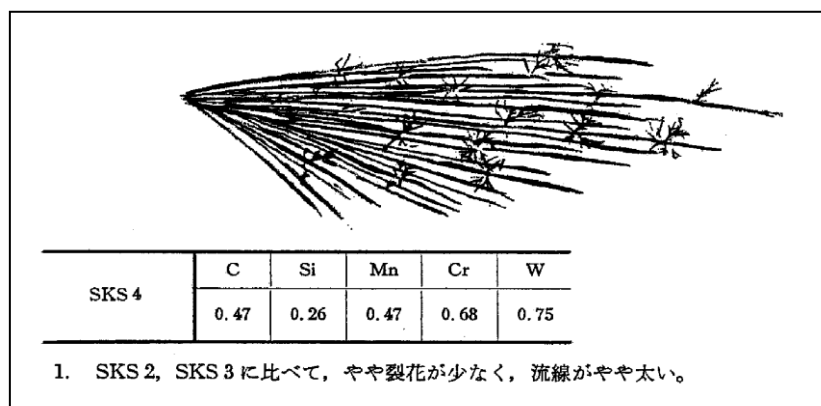


図 2.18 SKS 4 の火花スケッチ例(JIS G 0566-1980)

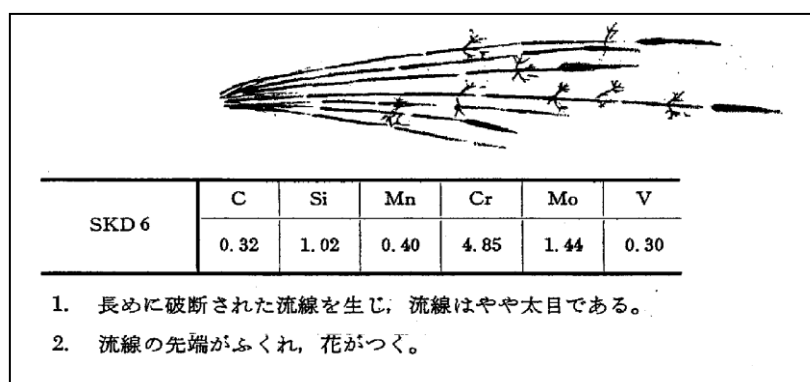


図 2.19 SKD 6 の火花スケッチ例(JIS G 0566-1980)



合金鋼の火花は、炭素含有量に影響を受けるものが多く、破裂の数及び複雑さは基本的に炭素含有量に影響を受ける。その上に、合金鋼に含まれるニッケル、クロム、モリブデン、タングステンなどの成分による特有の破裂形態が火花流線形状を特徴づけている。また、複数の元素を含有する場合は、すべての元素の特徴が必ずしも現れるとは限らない。

このような場合には、高速度 CCD カメラやデジタルカメラを用いたり、流線の通過数、流線の色などを計測したりして、判別する方法を併用すると、鋼種判別がしやすくなると考えられる。

### 2.3 火花試験方法

本試験においてグラインダを用いた研削火花測定システムを図2.20に示す。グラインダ①に試験品②となる鋼材を押し当てて火花を発生させる。発生した火花を高速CCDカメラ③で撮影し、パーソナルコンピュータ④に取り込み、火花画像を解析する<sup>(3)</sup>。

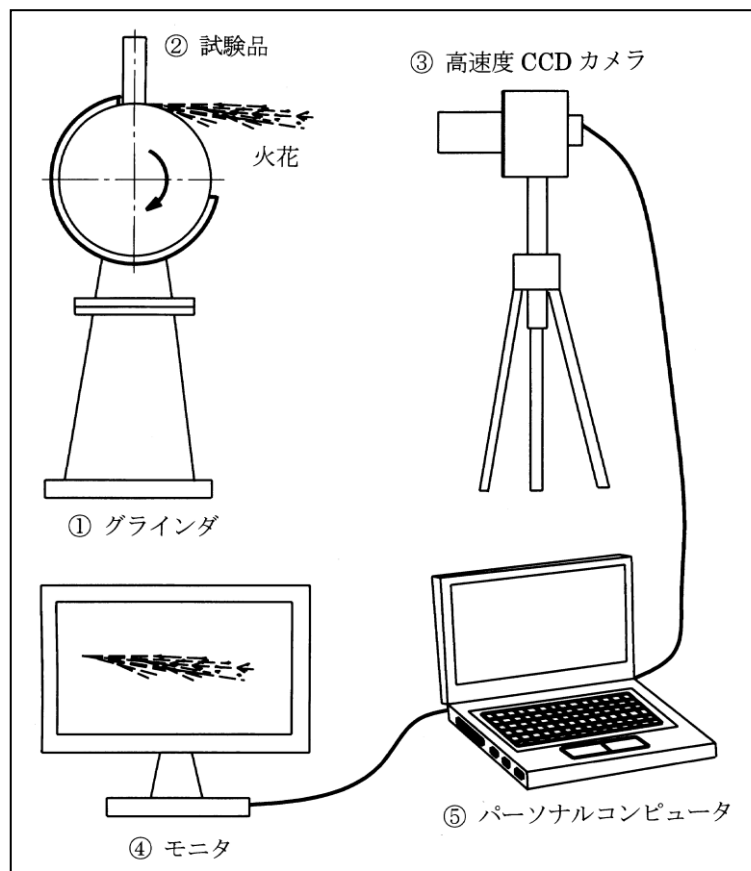


図2.20 火花測定システム

用いたグラインダは図 2.21 に示す日立工機社製卓上電気グラインダ(GBT5)であり，出力 400W である．砥石の回転数は 2970rpm，直径は 205mm であり，砥石周速度は 1600m/min 程度となっている．砥石は JIS 規格に準拠して，ビトリファイド A36N7V4T を使用している．



図 2.21 日立工機社製卓上電気グラインダ(GBT5)

試験品は，JIS規格に基づき，試験品火花の長さが500mm程度 になるよう砥石に押し当て，火花を発生させた．このときの押圧力はプッシュプルスケールを用いて測定したところ，約100Nとなっている．

発生した火花は，図 2.22 に示した高速度 CCD ビデオカメラ (HAS-500) を用いて撮影している．この時の高速度 CCD ビデオカメラのフレームレートとシャッタースピードは通常の動きの速い被写体の写真撮影を参考に 1/500 秒に設定している．撮影した火花の静止画や動画をパーソナルコンピュータに取り込み，画像解析ソフト「DIPP MOTION」及び「DIPP MACRO」を用いて火花数の計測や破裂の形状変化の解析を行う．



図2.22 高速度カメラHAS-500

表 2.3 に高速度 CCD カメラの仕様を示す。

表 2.3 高速度 CCD カメラ HAS-500 の仕様

|           |   |
|-----------|---|
| イメージ      | モノクロ  |
| 最大撮影コマ数   | 4000 コマ/秒   |
| 解像度       | 最高 2 マイクロ秒の電子シャッター・500 コマ/秒<br>で最大 1024×992                       |
| カメラサイズ・重量 | 88W×88H×67D(mm)・720g  |
| マウントの種類   | C マウント(1 インチ用)  |
| 撮影速度      | 100 コマ/秒, 200 コマ/秒, 500 コマ/秒, 1000 コマ/<br>秒, 2000 コマ/秒, 4000 コマ/秒 |
| シャッタースピード | 最高 1/500000 (秒)   |

## 2.4 実験に用いた標準試験品

試験品は図 2.23 に示すように化学成分が明らかな市販の火花試験標準品を用い、炭素鋼の S10C から S50C の 6 種類及び純鉄の電磁軟鉄 SUY と、合金鋼のうち代表的なものとして軸受鋼 SUJ2、クロムモリブデン鋼 SCM415、ニッケルクロムモリブデン鋼 SNCM447 について火花試験を行った。その化学成分を表 2.4 及び表 2.5 に示している。

試験時には図 2.23(a)のように黒皮部分を除去したものを使用した。



(a) 試験時の火花試験標準品



(b) 成分表付き火花試験標準品(炭素鋼, 合金鋼)

図 2.23 火花試験標準品

表 2.4 炭素鋼試験標準品の化学成分 (%)

| 材種   | C     | Si   | Mn   | P     | S     | Ni    | Cr    | W | Mo | V |
|------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|---|----|---|
| SUY  | 0.004 | 0.22 | 0.22 | 0.010 | 0.008 | 0.03  | 0.01  | — | —  | — |
| S10C | 0.084 | 0.2  | 0.37 | 0.013 | 0.013 | 0.046 | 0.08  | — | —  | — |
| S20C | 0.21  | 0.17 | 0.54 | 0.011 | 0.017 | 0.052 | 0.13  | — | —  | — |
| S30C | 0.31  | 0.2  | 0.69 | 0.019 | 0.018 | 0.058 | 0.073 | — | —  | — |
| S40C | 0.41  | 0.25 | 0.67 | 0.012 | 0.012 | 0.092 | 0.094 | — | —  | — |
| S45C | 0.44  | 0.26 | 0.67 | 0.016 | 0.017 | 0.067 | 0.066 | — | —  | — |
| S50C | 0.52  | 0.26 | 0.66 | 0.022 | 0.019 | 0.04  | 0.078 | — | —  | — |

表 2.5 合金鋼試験標準品の化学成分 (%)

| 材種      | C    | Si   | Mn   | P     | S     | Ni   | Cr   | W | Mo   | V |
|---------|------|------|------|-------|-------|------|------|---|------|---|
| CM415   | 0.14 | 0.28 | 0.72 | 0.014 | 0.011 | —    | 0.99 | — | 0.16 | — |
| SNCM447 | 0.46 | 0.24 | 0.76 | 0.012 | 0.014 | 1.72 | 0.75 | — | 0.17 | — |
| SUJ2    | 1.03 | 0.23 | 0.40 | 0.019 | 0.022 | —    | 1.44 | — | —    | — |

## 2.5 実験結果

### 2.5.1 火花画像の特性

実験で得られた火花の例を図 2.24 に示す。図 2.24 から明らかなように火花は放射状に流線が現れ、鋼材により流線の色、破裂の発生などが変化して現れる。火花は散乱する位置によっても、その形状が変化するが、JIS の規定をもとに、根本 (研削位置から 150 mm)、中央 (150mm～300mm)、先端 (300mm～500mm) に分けて、火花の特性を観察している。

JIS によるスケッチ図では、定性的な説明にすぎず、より詳細に解析する余地が残されているため、高速度 CCD ビデオカメラによる映像で観察・解析している。はじめに、炭素鋼 S50C を取り上げて、火花の散乱する位置によって画像状態の差異を解析している。まず、火花根本での 1 本の流線に着目した連続コマ画像を図 2.25 に示す。ここでは、流線の状態を判別しやすくするために 1 コマに撮影できるシャッタースピード、すなわち 1 コマの画像を 1/200 秒に設定している。図 2.25(a) の 1 コマ目と(b)の 2 コマ目に注目すると、突然火束が出現したように見える。ここで、コマ数とはある設定条件で撮影した画像数を示す。

砥石により試験品を初速度 30m/s で研削するとき、1/200 秒で撮影すると、火花の測定長さ 0.15m 分が撮影できることになる。しかしながら、一枚一枚の画像にはとぎれるように写っているため細かな変化は見えにくい。

図 2.25 の連続撮影をしたうちの 1 コマ目と 2 コマ目を合成したものと、1 コマ目から 4 コマ目までを合成したものを、それぞれ図 2.26(a)及び(b)に示す。両者とも流線が重なり合い火花形状の変化を判別しにくくなっている。

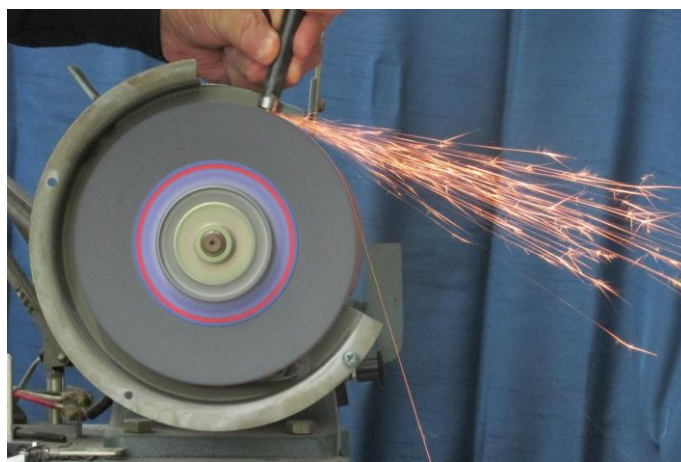


図 2.24 実験で得られた火花の例 (S30C)



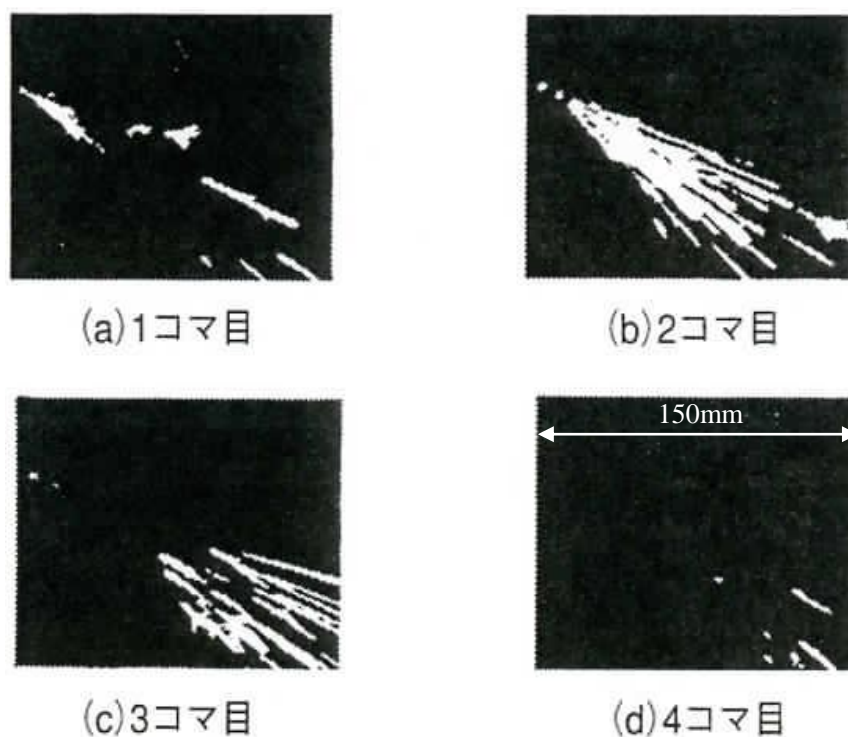


図 2.25 火花根本の連続画像 (S50C)

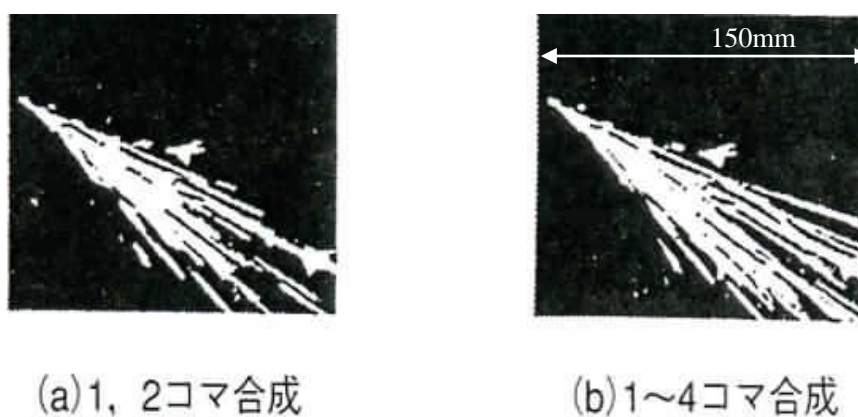


図 2.26 火花根本の合成画像 (S50C)

図 2.27 に火花中央の連続コマ画像を，図 2.28 に火花中央の合成画像を示している．図 2.27 も図 2.25 と同様に 1 本の流線を基準に撮影したものである．図 2.25 と異なり 1 コマで流線の長さが短くなり，速度が遅くなっているのがわかる．そのため流線の変化が火花根本以上に観察できる．

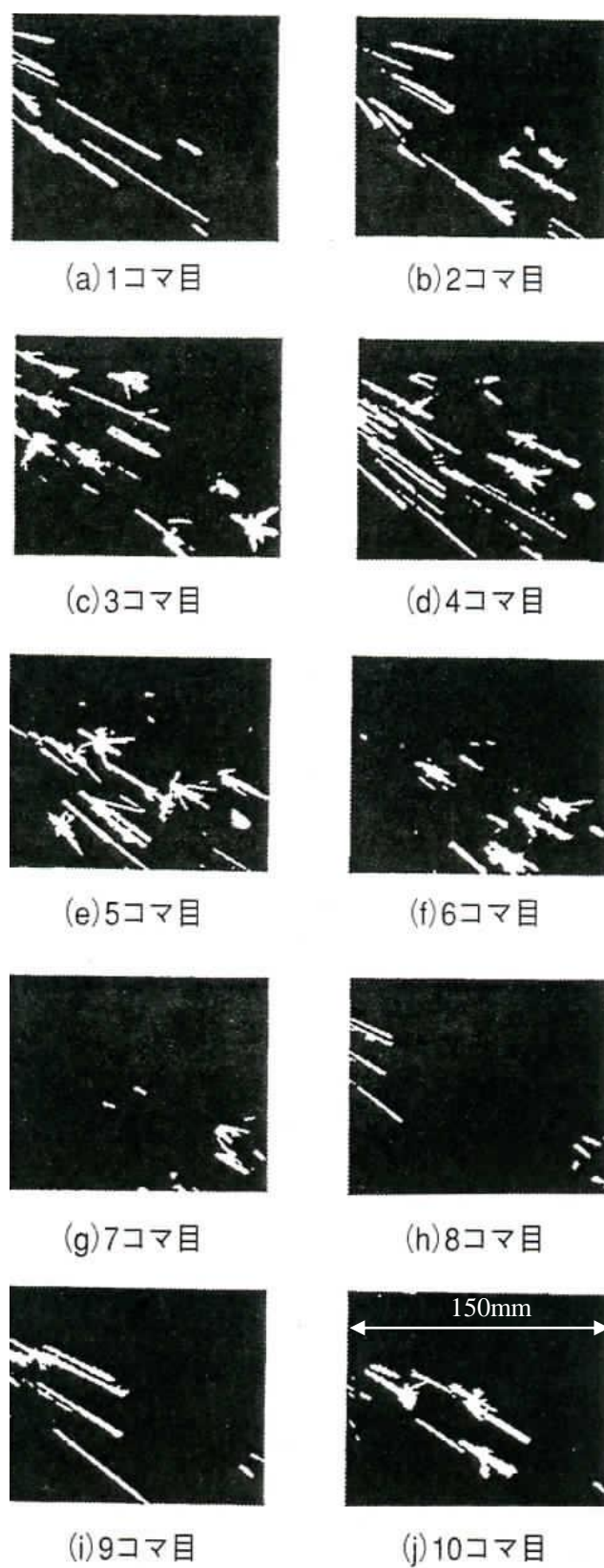


図 2.27 火花中央の連続画像 (S50C)



図 2.28 に示した合成画像においても火花根本の合成画像よりは流線が密集しておらず、破裂の数や形状を確認できる。しかし、図 2.28(c) の 1～8 コマ合成、及び(d) の 1～10 コマ合成のように合成コマ数が多くなると後から発生した流線なども合成され、火花の形状を観察しにくくなることが確認できる。

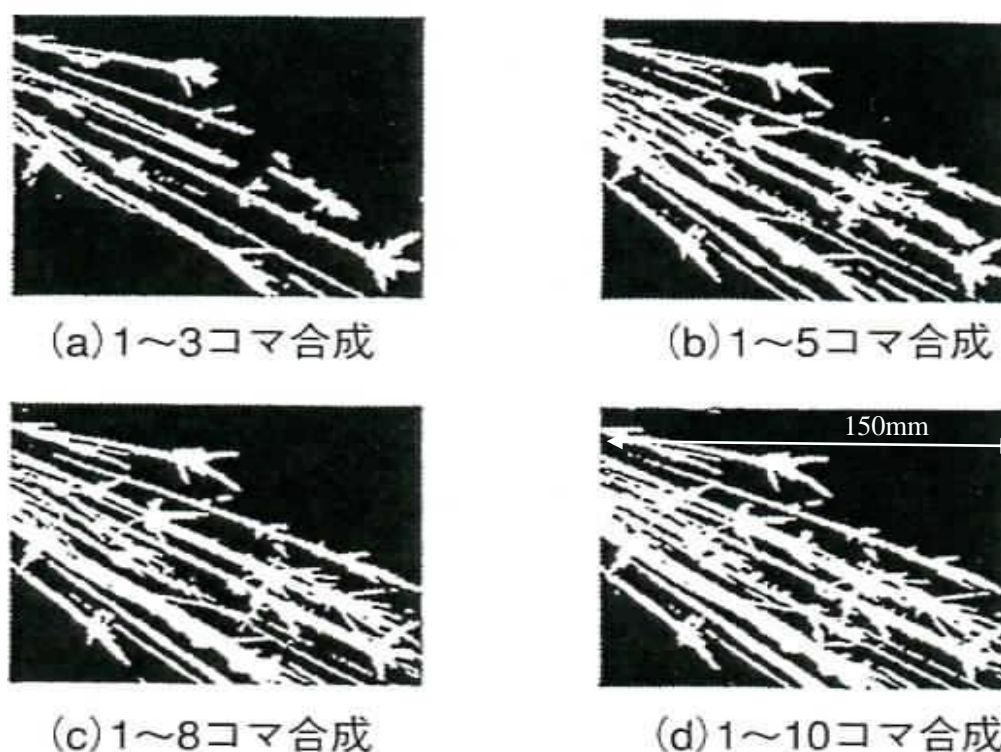


図 2.28 火花中央の合成画像(S50C)

図 2.29 に火花先端の連続コマ画像を示す。図 2.26, 図 2.28 及び図 2.30 を比べると流線の長さが図 2.26, 図 2.28, 図 2.30 の順に短くなり、根本から先端に行くにしたがって速度が減少していることがわかる。火花先端においては 1 コマ 1 コマの変化が少ないためコマ画像では火花の形状は予測しにくい。しかし、図 2.29 の画像を合成すると図 2.30 のように、火花根本、火花中央よりも先端の火花形状をはっきり観察することができる。実験では、約 5 コマ程度重ねた場合に火花形状が明らかとなり、1 コマ当たりのシャッタースピード 1/200 秒に重ね合わせた画像 5 枚、すなわち、1/40 秒前後の撮影速度（シャッタースピード）が有効な画像状態であることが確認でき、破裂の数の測定もし易くなる。ただし、JIS 火花試験の条件のもとで行なわない場合には、研削条件によって火花の発生状況が異なるため、鋼材判別の意味がなくなることが付記する。

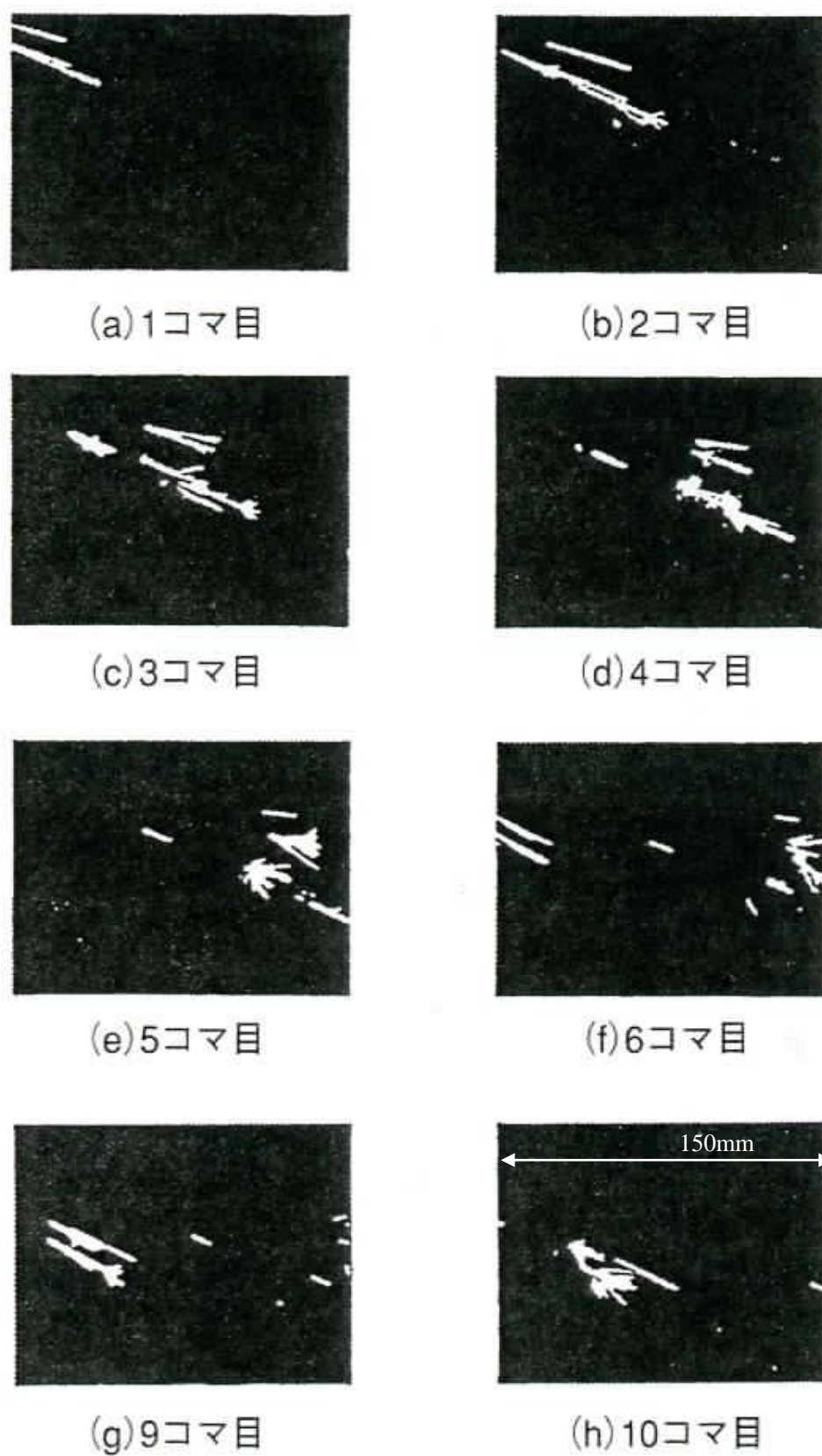


図 2.29 火花先端の連続画像 (S50C)

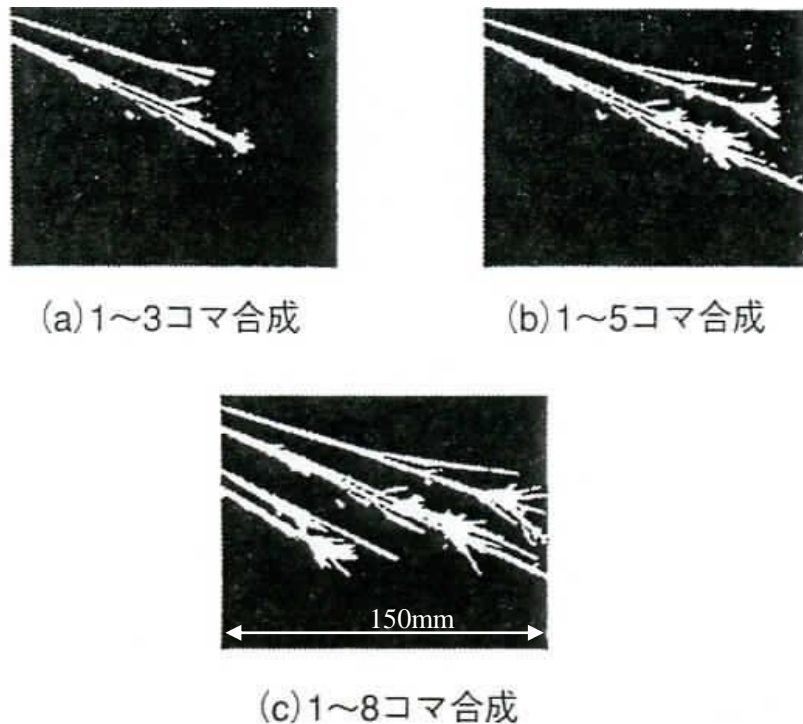


図 2.30 火花先端の合成画像 (S50C)

### 2.5.2 炭素鋼の火花形状

図 2.31 に本実験で得られた炭素鋼の火花画像を 5 枚重ねて示している．高速撮影することによって炭素含有量および成分元素による火花形状の変化が観察でき，2~3 本断裂，数本断裂，数本断裂 2 段咲き，数本断裂 3 段咲きなどが確認できた．図 2.31 (a) の S10C (炭素 0.1%) の断裂は単調であり一度に 3~4 本に分岐，棘が現れる．図 2.31(b)の S30C(炭素 0.3%) では数本に分岐した後，さらに断裂が生じる，いわゆる 2 段咲きが発生する．図 2.31(c)の S40C(炭素 0.4%) では S30C よりもう一段断裂が増え，計 3 回の断裂が 1 本の流線より生じる 3 段咲きが発生する．図 2.31(d)の S50C(炭素 0.5%)では S40C に似ており，3 段咲きが生じ，その発生数が多くなる．また，断裂時に花粉が発生する点で S40C(炭素 0.4%)と異なるが，この花粉については発生判別の難しい．以上により，炭素鋼火花の場合，主な特徴として，炭素断裂が挙げられる．断裂は鋼に含まれる炭素含有量により変化し，鋼種判別に重要な役割を担っていることが分かり，高速度撮影画像を複数枚重ねることにより，より詳細に鑑別できる．

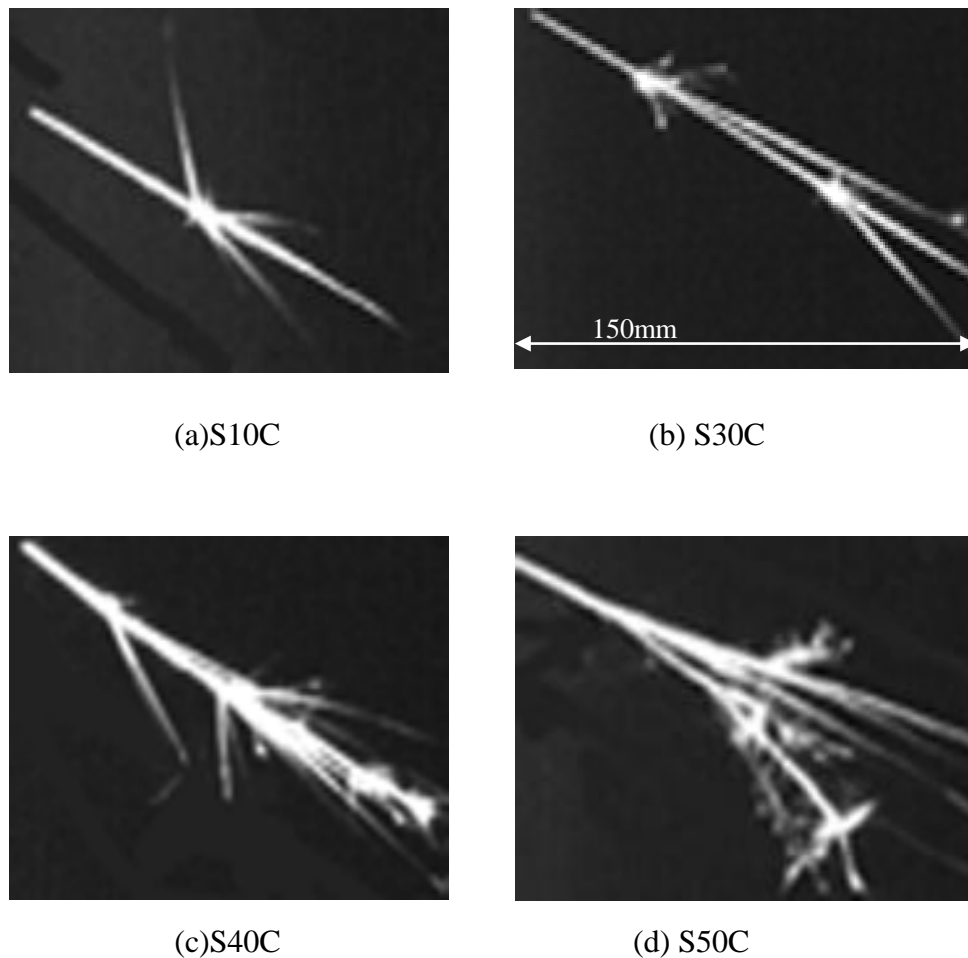


図 2.31 高速度 CCD カメラによる炭素鋼火花画像

### 2.5.3 合金鋼の火花形状

高速度 CCD カメラにより得られた合金鋼の火花破裂画像の例を図 2.32 に示す. 図 2.32(a)の SUJ2 は, クロム(Cr)を含み, 菊状花が現れると言われているが, 本実験では, 多数の破裂は確認されたものの, この菊状花は見つけにくかった. 図 2.32(b)の SCM415 は, モリブデン(Mo)の特徴である槍先光を生じ, モリブデンの含有量により槍先の大きさが変化する. 図 2.32(c)の SNCM447 は, ニッケル(Ni)の特徴であるふくれせん光を生じ, 発生場所は流線から破裂が生じる直前に多く見られた. このように合金鋼についても高速度 CCD カメラによる測定によって, 添加元素も推定し易くなる.

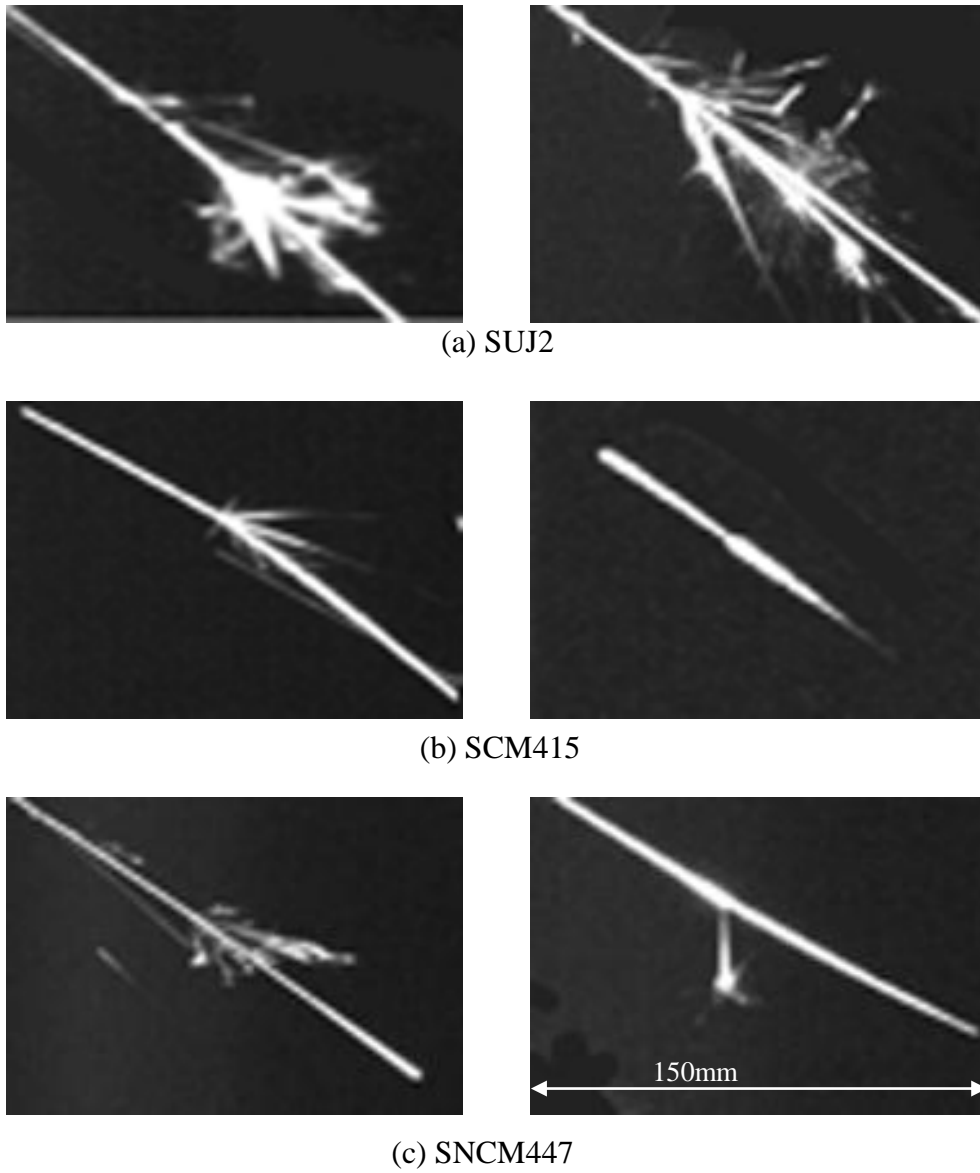


図 2.32 高速度 CCD カメラによる合金鋼火花



#### 2.5.4 火花の任意断面通過流線の数

撮影した火花の画像を火花破裂形状の比較，ライン濃度，火花 RGB 値の変化の3つの項目について画像解析ソフトを用いて比較している<sup>(4),(5)</sup>。

##### (1) 火花破裂形状の比較

高速度 CCD カメラにより得られた火花画像とともに，デジタルカメラで撮影した結果を図 2.33 に示す。ISO 感度 100，シャッタースピード 1/40 秒，絞り 5.6 に設定し，撮影している。炭素含有量の増加とともにトゲの発生，破裂，2 段破裂，多段破裂と変化していく様子が鮮明に表れ，形状変化から炭素鋼の種類を容易に判別できる。デジタルカメラについては簡便で，高性能な製品が出てきており，火花の変化を検討するツールとして有効であり，今後利用する方法を検討していく予定である。

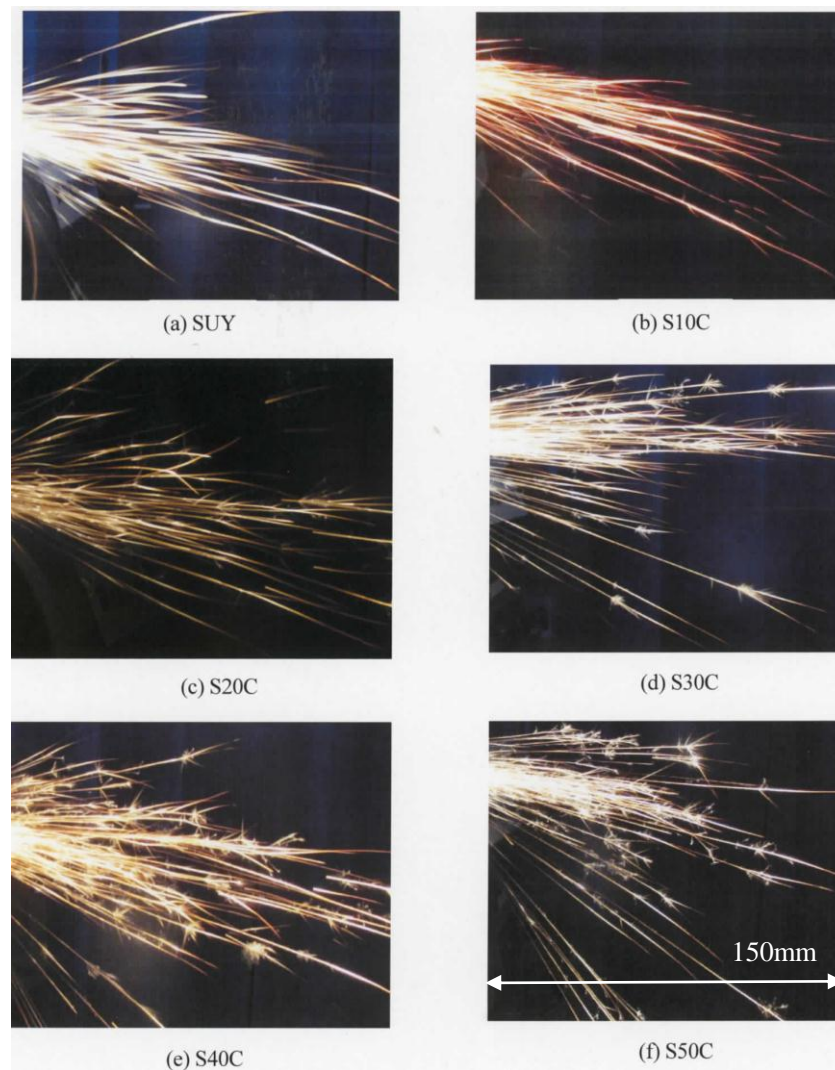


図 2.33 デジタルカメラによる炭素鋼火花写真画像

## (2) 計測ライン通過火花数

試験品の炭素含有量と火花流線の数の関係を明らかにするために、画像解析ソフト「Dipp Motion DX」を用いて火花の流線上の任意の位置に計測ラインを引き、その計測ライン上を通過した火花流線の数をカウントしている。

ここで、計測ライン通過火花数とは、図 2.34 のように、火花を撮影した画像上の位置に任意のラインを引き、そのライン上を通過した火花流線の数を時系列的に表示したもの（図 2.35）である。火花が点となって流れていく様子がわかる。

火花が通過するライン上の幅が縦軸に対応するがほぼ中央位置で火花の明るさが最も強く現れている。また炭素量の増加に伴い画像上の白い斑点すなわち火花流線の数が増加していることがわかる。この白い斑点を 2 値化してから数をカウントしたものを図 2.36 に示している。図 2.36 に示したように平均カウント数は SUY が 560 本、S30C が 986 本、S50C が 1192 本と炭素の増加に伴い火花流線の数が増加していることがわかる。

火花破裂数も炭素含有量の増加とともに増加するが、計測ライン通過火花も同じ特性を示し、この方法もパーソナルコンピュータ利用のため簡便に評価できる。

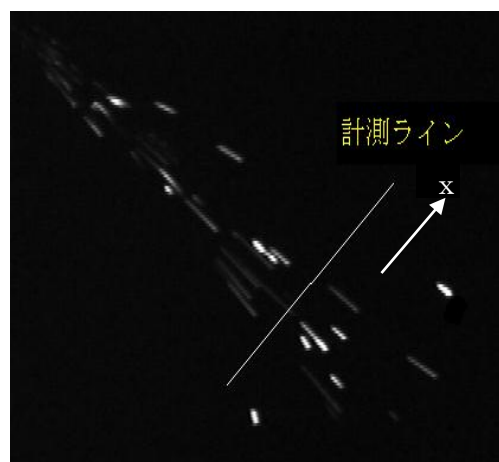


図 2.34 2D 解析画像

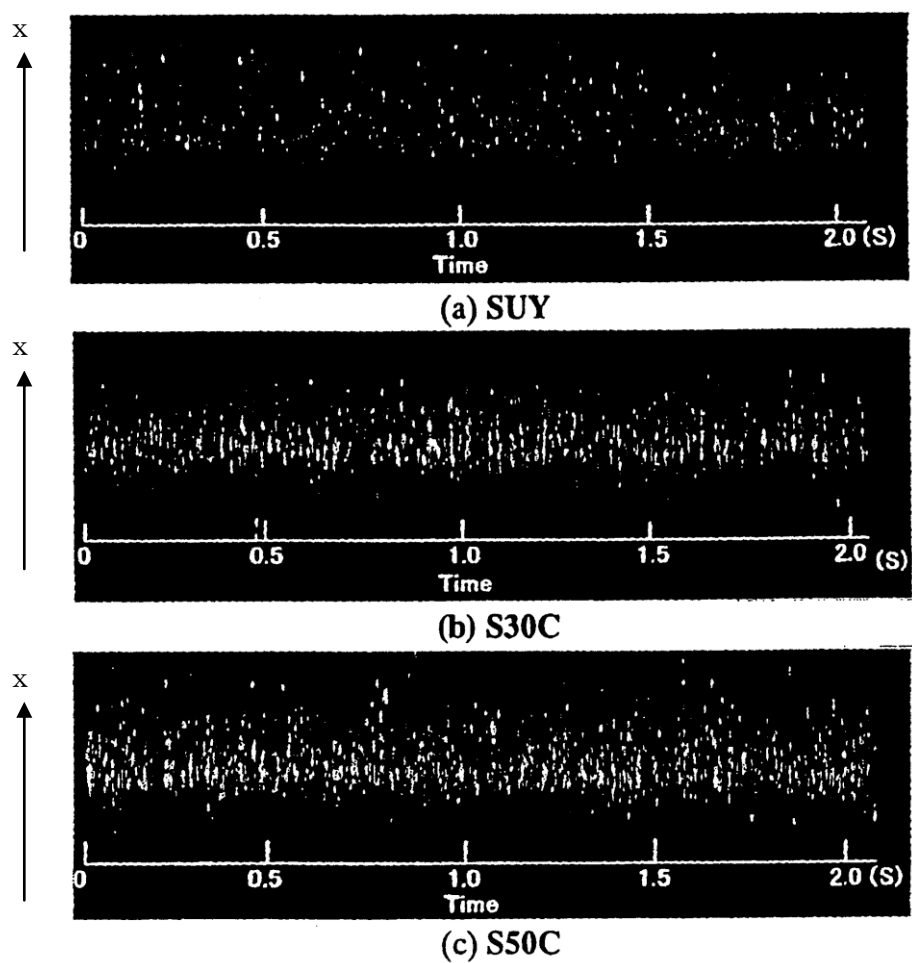


図 2.35 計測ライン通過火花数の時系列表示

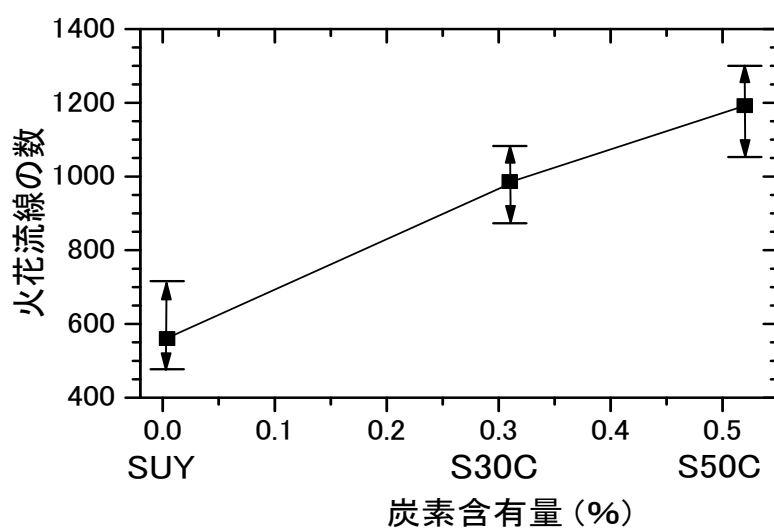


図 2.36 炭素鋼と火花数の関係

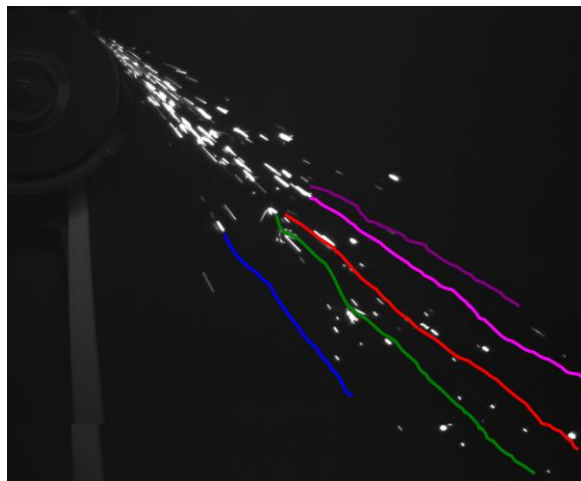


### (3) 火花時系列強度値

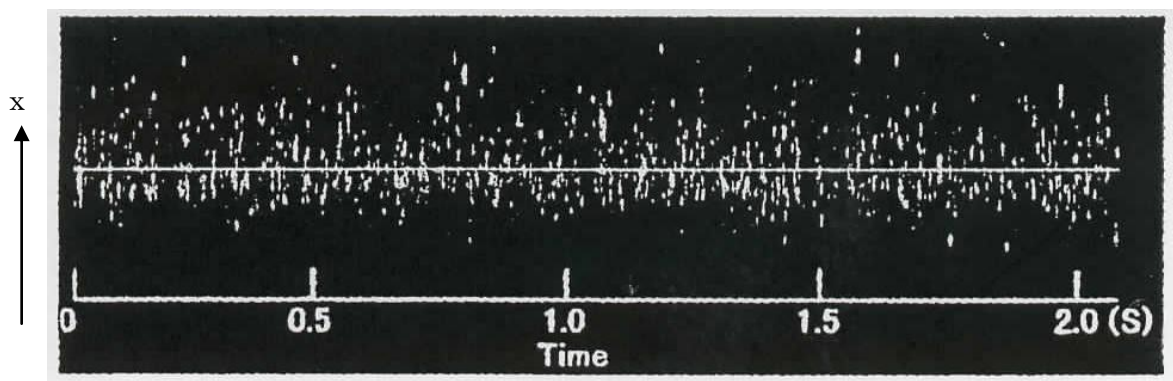
図 2.37 に示すように火花流線が最も多く通過する中心部分に計測位置を定め、その位置上のプロファイルについてプロットした結果を図 2.38 に示している。

SUY のように炭素含有量の少ない鋼材では、流線の数が少なく、強度にも強弱の波が現れている。S30C の場合には、炭素破裂の数とともに流線の数が増加している。S50C のように炭素含有量が増えると、炭素破裂の増加とともに流線の数も増大している。以上のことから、炭素含有量の増加にしたがって、火花の流線の数も増大することが明らかになった。

このデータを FFT(高速フーリエ変換)解析した結果を図 2.39 に示している。



(a)火花流線



(b) 火花時系列のプロファイルの計測位置

図 2.37 火花流線と火花時系列のプロファイルの計測位置

図 2.39 より、炭素含有量が多い材料ほど強度値が高く現れ、かつ密になっていることがわかる。また、図 2.39 の FFT 解析によると砥石の回転数に依存した

50Hz においてパワースペクトルが明瞭に現れており、炭素量が増加し、硬くなるほどその値が強く現れるようになっている。

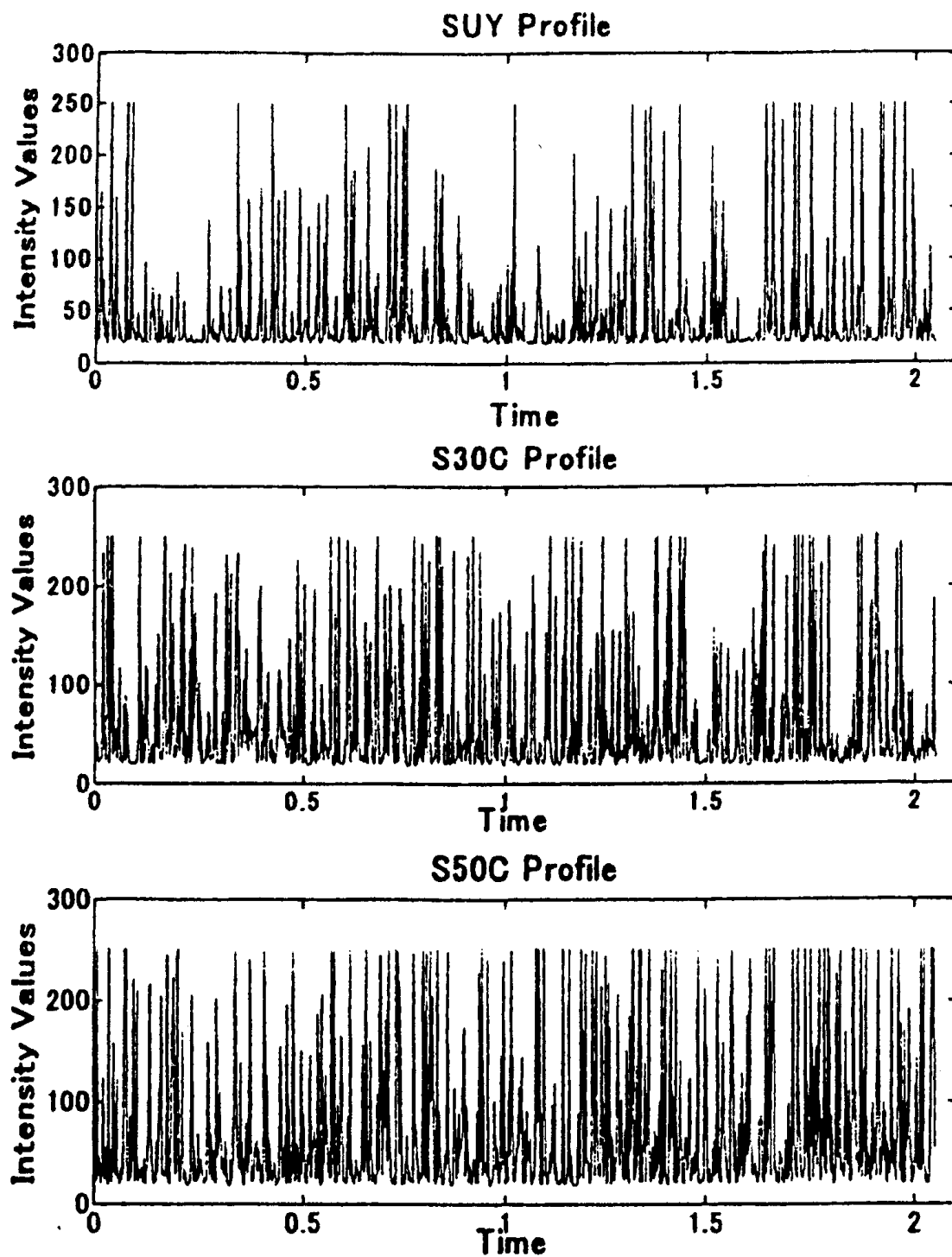


図 2.38 計測ライン通過火花強度のプロファイル

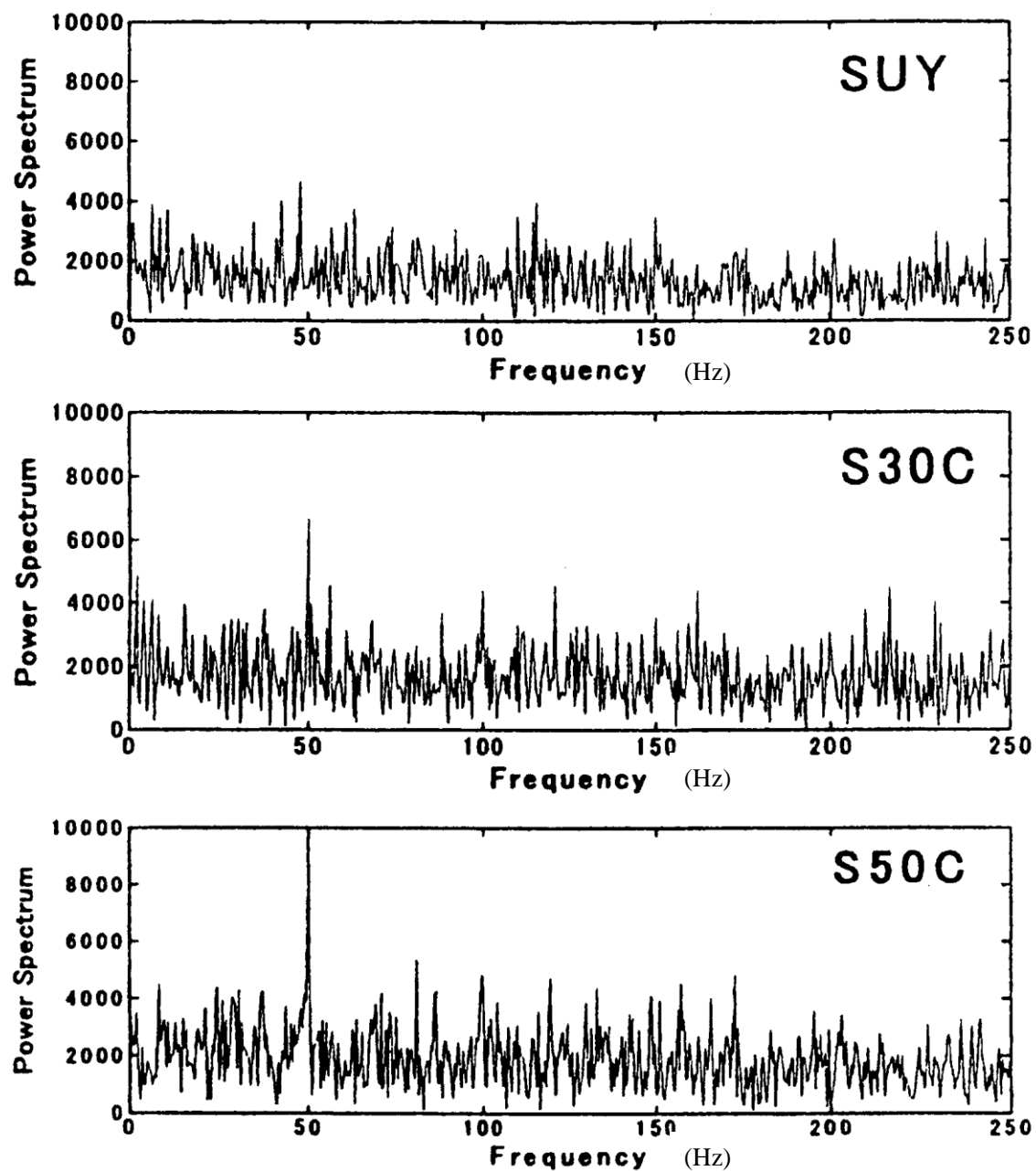


図 2.39 火花流線のプロファイルの FFT 解析

### 2.5.5 火花流線の色

ビデオカメラで撮影した火花画像の RGB 色別ヒストグラムを図 2.40 に示している。SUY, S30C, S50C と炭素含有量が多い材料ほど赤みが増していることがわかる。赤より変化は小さいが、緑と青についても全体的にピクセル値が増加していることから、火花流線は増えていることがわかる。また、炭素含有量が多い材料ほど、炭素破裂が増大し、明るい赤色の火花が多くなると考えられる。

この RGB 値を定量化することにより、火花の発色識別による鋼種判別も推定できると考えられるため、今後の研究課題としたい。

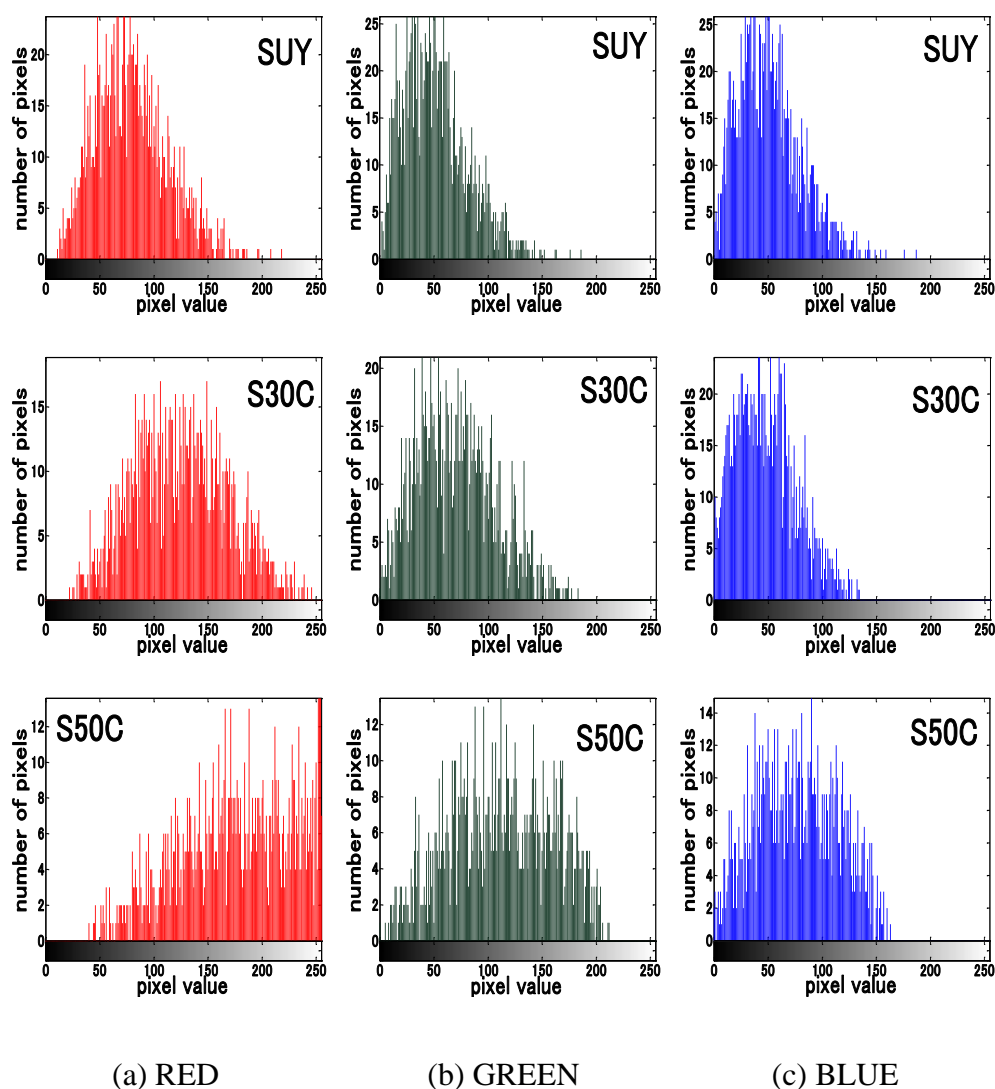


図 2.40 火花の RGB 色別ヒストグラム

## 2.6 おわりに

高速度 CCD カメラとデジタルカメラを用いた二つの実験方法から、火花と鋼の化学成分の関係について検討し、以下の傾向が確認された。

(1) 従来の火花試験で判明し難い鋼種鑑別も、高速度 CCD カメラを利用した鋼種判定システムを構築することによって画像を 1 枚ずつ、及び複数枚重ねることにより火花形状の変化を検討でき、鋼種判定に利用できると考えられる。

(2) JIS 火花試験条件において、高速度 CCD カメラによる撮影画像を 5 枚程度重ね合わせることで、通常のデジタルカメラの撮影条件、ISO 感度 100、シャッタースピード 1/40 秒程度の撮影が得られ、未熟練者でも判別可能になることが予想される。

(3) 鋼種判別に、流線の任意断面通過数、流線速度などを測定することにより、定性的な変化を調べることができ、材料判別に利用可能である。

(4) ビデオカメラで撮影した火花画像の RGB 色別ヒストグラムより、RGB 値を定量化すれば、流線の色の違いによる鋼種判別に利用可能であると考えられる。

## 第3章 ファイアボール形状と機械材料との関係

### 3.1 はじめに

鉄鋼材料は、あらゆる分野で使用されている基盤材料であり、広範な用途や目的に応じて、数多くの鋼材の種類が開発されている。ほとんどの鋼材は外見上見分けがつかず、文字や塗色表示で識別されているが、鋼材の種類によって機械的性質が異なっているため、誤った鋼材を使用すると、強度不足からくる深刻な破損事故につながる。このことから安全な製品づくりのために用いる鋼材が、目的に合った鋼材であるかどうかの確認業務は欠かせない。このため JIS においても「鋼の火花試験法(Method of spark test for steels)[JIS G 0566]が規定されている。この試験法はグラインダで研削火花を発生させ、その火花の形状、色、数などから鋼材の種類の推定、異材混入の鑑別をすることを目的としている。しかし前述したように火花が発生する時間は短く、肉眼で判別するには、鑑別する人間の習熟度と技能に依存するため、熟練を要する。熟練者の高齢化に伴い、極度に不足している現状では未経験の技術者にも容易に鋼材を鑑別できる方法が要求される。第2章では、高速度カメラを用いた炭素鋼の火花特性を明らかにする鑑別方法を提案した。

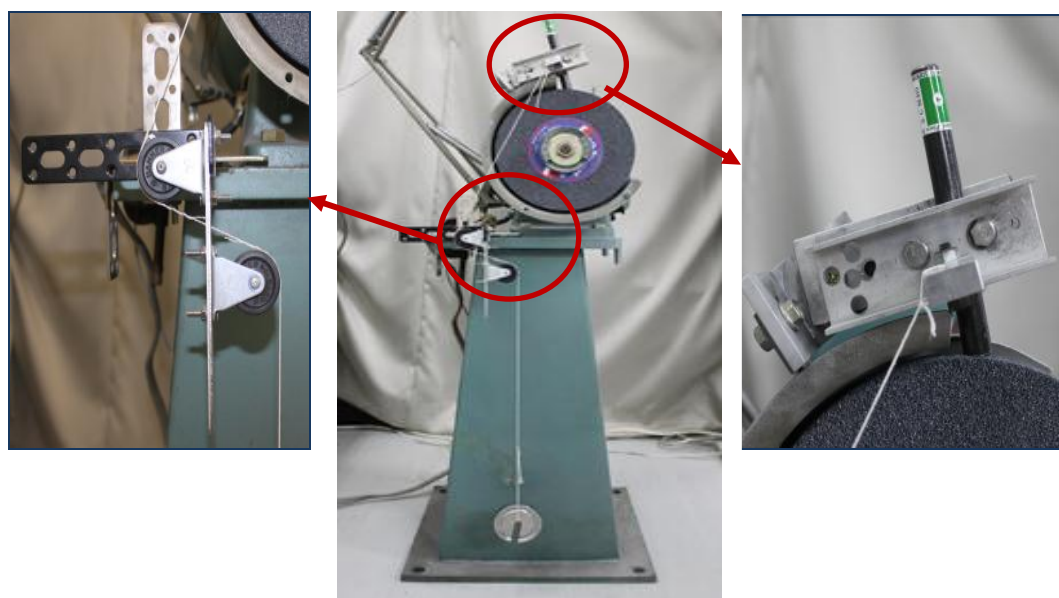
本章では鋼材の判別を JIS による火花試験方法だけでなく、研削切りくずが溶融したファイアボールを SEM(Scanning Electron Microscope)観察し、その形状変化の検討、機械材料の違いによるファイアボールの形状変化を明らかにし、材料の鑑別に利用することを述べている。

ここで、研削切りくずが研削熱及び酸化熱で溶融し、表面張力で球状の火の玉状になったもの、及び飛散中に冷却されたものを含めてファイアボールと呼ぶ。

### 3.2 実験装置及び方法

火花発生装置は図 3.1 に示すように両頭グラインダを用い、試験品の定圧研削を行うために試験品の取付け部分と滑車部分に糸を介して重錘の自重により荷重を加え、各鋼材への押付力を一定にしている。また2つの滑車に糸を通すことにより試験品への振動の発生を抑制し、安定した火花が発生するよう工夫している。実験では火花長さ約 1m、質量 1kg の重錘を使用し、2970rpm で回転するグラインダに直径 12mm の鋼材を押し当てている。重錘を吊す糸が作用する方向と試験品が接触する方向の角度は 50°となっており、実際に試験品に作用す

る押付力は  $(1.0\text{kg} \times 9.8\text{m/s}^2) \cos 50^\circ = 6.3\text{N}$  である．発生した切りくずを採集し，SEM を用いてファイアボールの観察を行っている．試験品は化学成分が明らかな市販の鋼材を使用しており，表 3.1 に示すように，炭素鋼，合金鋼，工具鋼の計 20 種類を取り上げている．ファイアボールは数多く生じ，鋼種により異なるが，同一種類では同じような形状のものが多く現れるため，その中から火花流線の根本部分で採取した初期段階のファイアボール，その中央部分のある程度成長したもの，及び先端部分の破裂する段階まで進んだものを観察して撮影している．実験に用いた研削砥石は A36-O-V，すなわち褐色アルミナ質砥粒，粒度 36，組織 O，ビトリファイドボンドである．



(a) 滑車部分の拡大図 (b) 研削火花発生装置全体図 (c) 試験品取付部の拡大図

図 3.1 研削火花発生装置

表 3.1(a) 炭素鋼の化学成分 [%]

| 鋼材   | C     | Si   | Mn   | P     | S     | Ni    | Cr    | W | Mo | V |
|------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|---|----|---|
| S10C | 0.084 | 0.2  | 0.37 | 0.013 | 0.013 | 0.046 | 0.08  | — | —  | — |
| S20C | 0.21  | 0.17 | 0.54 | 0.011 | 0.017 | 0.052 | 0.13  | — | —  | — |
| S30C | 0.31  | 0.2  | 0.69 | 0.019 | 0.018 | 0.058 | 0.073 | — | —  | — |
| S40C | 0.41  | 0.25 | 0.67 | 0.012 | 0.012 | 0.092 | 0.094 | — | —  | — |
| S50C | 0.52  | 0.26 | 0.66 | 0.022 | 0.019 | 0.04  | 0.078 | — | —  | — |

表 3.1(b) 合金鋼の化学成分 [%]

| 鋼材      | C    | Si   | Mn   | P     | S     | Ni   | Cr   | W | Mo   | V |
|---------|------|------|------|-------|-------|------|------|---|------|---|
| SCr420  | 0.22 | 0.28 | 0.75 | 0.012 | 0.014 | —    | 1.00 | — | —    | — |
| SCr440  | 0.39 | 0.23 | 0.76 | 0.015 | 0.017 | —    | 1.02 | — | —    | — |
| SNC415  | 0.14 | 0.24 | 0.53 | 0.010 | 0.012 | 2.09 | 0.33 | — | —    | — |
| SNC631  | 0.31 | 0.28 | 0.52 | 0.025 | 0.008 | 2.67 | 0.81 | — | —    | — |
| SCM415  | 0.14 | 0.28 | 0.72 | 0.014 | 0.011 | —    | 0.99 | — | 0.16 | — |
| SCM440  | 0.38 | 0.21 | 0.75 | 0.024 | 0.009 | —    | 1.04 | — | 0.16 | — |
| SNCM420 | 0.19 | 0.26 | 0.56 | 0.014 | 0.012 | 1.74 | 0.58 | — | 0.22 | — |
| SNCM447 | 0.46 | 0.24 | 0.76 | 0.012 | 0.014 | 1.72 | 0.75 | — | 0.17 | — |

表 3.1(c) 工具鋼の化学成分 [%]

| 鋼材    | C    | Si   | Mn   | P     | S     | Ni    | Cr    | W    | Mo   | V    |
|-------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|
| SK85  | 0.84 | 0.26 | 0.39 | 0.009 | 0.004 | 0.043 | 0.032 | —    | —    | —    |
| SK105 | 1.05 | 0.25 | 0.43 | 0.012 | 0.005 | 0.031 | 0.10  | —    | —    | —    |
| SKS4  | 0.52 | 0.34 | 0.47 | 0.017 | 0.008 | —     | 0.89  | 0.85 | —    | —    |
| SKS2  | 1.04 | 0.23 | 0.68 | 0.013 | 0.011 | —     | 0.80  | 1.02 | —    | —    |
| SKD61 | 0.35 | 0.95 | 0.46 | 0.021 | 0.006 | —     | 5.20  | —    | 1.15 | 0.59 |
| SKD4  | 0.33 | 0.29 | 0.48 | 0.018 | 0.012 | —     | 2.65  | 5.36 | —    | 0.39 |
| SKT4  | 0.51 | 0.29 | 0.79 | 0.010 | 0.006 | 1.68  | 1.30  | —    | 0.31 | —    |



### 3.3 炭素鋼並びに合金鋼のファイアボール形状と特徴

火花試験を用いた鋼材の判別は、第2章で示したように通常肉眼で行なわれ、火花の形状は JIS G 0566 (1980) のように炭素含有量の違いや添加元素の違いにより、火花の破裂が様々な特徴を示すことから比較鑑別が広く行われている。

#### 3.3.1 火花発生メカニズム

研削切りくずの火花発生の主な原因は研削熱によるもの(研削点温度 800℃以上)と酸化還元反応によるものが挙げられる。

火花の発生は図 3.2 のように研削されて高温となった金属の酸化により生ずるもので、関係する酸化鉄には  $\text{FeO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  があり、状態により変化する。さらに火花に破裂が起きるのは、含有されている炭素が燃焼時に空気中の酸素と化合して一酸化炭素の気体ガスが発生し、それが破裂の要因とされており、化学式で示すと次式のように表される<sup>(6)</sup>。

- ・鉄（鋼）が酸化し、酸化鉄が生じる；



- ・酸化鉄が炭素と還元反応し、一酸化炭素を発生する；



- ・発生した一酸化炭素が外部に出ず溶滴内において均衡を保つ；

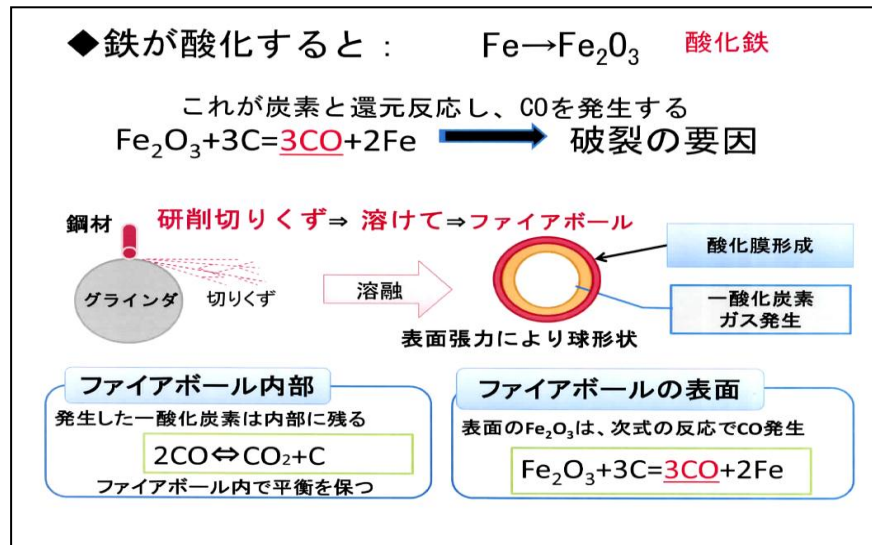


ただし、この反応は高圧下時に左から右へ、高温下の場合左から右側へ反応する。

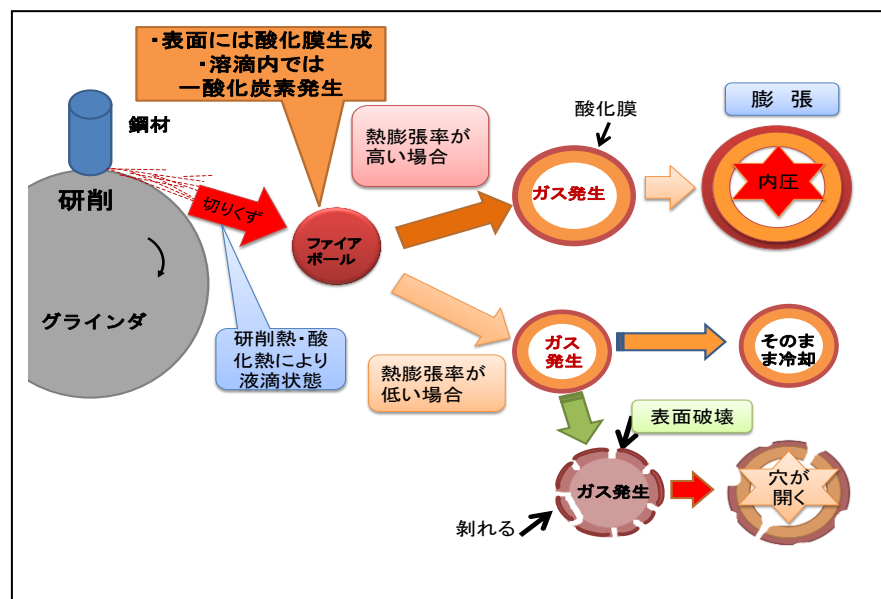
- ・溶滴表面では  $\text{FeO}$  が存在し、上記反応とともに次式の  $\text{CO}$  を発生する；



このように溶滴の内側と外側表面で酸化と還元が同時に行われ、この化学反応で発生した  $\text{CO}$  (一酸化炭素) が破裂の要因であると考えている。炭素含有量が多い場合、この一酸化炭素による内圧が表面の溶融膜の強さより高くなり、破裂が起き易くなる。破裂後、未反応の炭素が残っていれば、同様に一酸化炭素が発生・増加し、次の破裂を起こすこととなる。



(a) ファイアボールの発生メカニズム



(b) 破裂のメカニズム

図 3.2 火花発生メカニズム

### 3.3.2 材料の物性値について

ファイアボールの特性変化には、材料の機械的性質の温度による変化、熱膨張などの熱因子、添加された元素による化学的変化、炭素含有量、酸化膜の厚さ、酸化膜の強度、結晶粒界の挙動、さらにファイアボールの内圧並びに生じる応力変化などの力学的要因が関係するとみなせる。

材料の機械的性質の例として、炭素1%までの炭素鋼は炭素量が増えるにつれ、

引張強さ、降伏点は増加するが、伸び、シャルピー衝撃値は減少する<sup>(7)</sup>。

温度に関する機械的性質の値については、引張り強さ、ブリネル硬さが、200～300℃くらいまでは増加し、ある最大値を示した後減少する。伸びはこれとは逆に温度上昇するにつれ減少し、200～300℃あたりで最小値を示し、その後、温度の上昇とともに伸びの値は増加することなどが示されている<sup>(7)</sup>。

炭素の他に、ニッケル、クロム、タングステン、モリブデン、バナジウムなどを加え、機械的強度を向上させ、焼入れ性を高め、耐摩耗性を向上させている合金工具鋼もある。表3.2 にファイアボールの特性に影響すると予想される添加されている金属とその酸化物の融点と機械的性質を示す<sup>(8)～(11)</sup>。さらに、金属と酸化物の熱膨張係数の値を表3.3 に示す<sup>(12)～(14)</sup>。ここで、表中の温度は熱膨張係数測定時の温度を示す。

表3.2 金属及びその酸化物の機械的性質および融解点 [°C]

| 金属及び<br>酸化物                    | 融解点<br>[°C] | 縦弾性係数<br>[10 <sup>11</sup> Pa] | 引張り強さ<br>[9.8MPa] | 伸び<br>[%] | ビッカース硬さ<br>[Hv] |
|--------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------------|-----------|-----------------|
| Fe                             | 1539        | 1.90                           | 22                | 35        | —               |
| Ni                             | 1890        | 2.05                           | 32.2              | 30        | 60              |
| Cr                             | 1455        | 2.53                           | 42                | 44        | 130             |
| Mo                             | 2625        | 3.27                           | 49                | 50        | 160             |
| W                              | 3410        | 4.027                          | 60                | 0         | 360             |
| V                              | 1835        | 1.36                           | 19                | 39        | 55              |
| FeO                            | 1360        | —                              | —                 | —         | —               |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1550        | —                              | —                 | —         | —               |
| Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> | 1538        | —                              | —                 | —         | —               |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1990        | —                              | —                 | —         | —               |
| NiO                            | 1998        | —                              | —                 | —         | —               |
| MoO <sub>3</sub>               | 下限値795      | —                              | —                 | —         | —               |
| WO <sub>3</sub>                | 1473        | —                              | —                 | —         | —               |

表3.3 金属とその酸化物の熱膨張係数

| 金属および酸化物 | 熱膨張係数<br>[ $10^{-6}\text{K}^{-1}$ ] | 温度<br>[ $^{\circ}\text{C}$ ] | 金属および酸化物                       | 熱膨張係数<br>[ $10^{-6}\text{K}^{-1}$ ] | 温度<br>[ $^{\circ}\text{C}$ ] |
|----------|-------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| Fe       | 14.6                                | 800                          | FeO                            | 12.2                                | 100～1000                     |
| Cr       | 9.5                                 | 700                          | Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> | 16.6                                | 25～1000                      |
| Ni       | 16.3                                | 900                          | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 12.5                                | 25～1000                      |
| Mo       | 4.8                                 | 25                           | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 8.7                                 | 25～1200                      |
| W        | 4.5                                 | 25                           | NiO                            | 17.1                                | 25～1000                      |

金属は種々の大きさの結晶粒の集合体であり、高温にさらされることで結晶粒が粗大化したり、組織が不均一になったり、結晶粒の大きさが異なるため、粒界部分に結晶粒界応力腐食割れなどが生じる。また冷却過程で収縮時の圧力変化や外力などから結晶粒の割れが生じる場合がある。これらの欠陥によりファイアボールで形成された酸化膜の強度が弱まり、酸化膜の亀裂の発生や酸化膜自身の破壊の可能性が考えられる。

また、多結晶は大小様々な結晶の集まりであるため、ファイアボールの表面のゆがみが様々な表面性状の形成に起因すると考えられる。金属の酸化には金属と酸素と反応する成分間の化学親和力とが関係するが、金属と酸素の親和力を順番に配列すると、表3.4 に示した配列のようになり<sup>(15)</sup>、表中の左のCs(セシウム)金属が最も酸素と反応しやすく、右側の金属に行くにつれ、酸と反応しにくくなる。この表には、比較のために非金属元素のH(水素)も含めているが、水素より右に位置する金属は酸化剤がないと酸と反応することがない不活性な金属である。熔融した鉄には、かなりの酸素が融解し、熔融鉄は冷却・凝固の過程で酸化鉄となり、分離されるために熔融鉄中の酸素量は減少する。しかし、熔融鉄の中に他の添加元素が共存していると、親和力の強い元素と酸素が結合して酸化物が生成される。また各元素の酸化し易さは酸化物生成に対する標準生成自由エネルギーの値が関係し、この値が小さい金属ほど酸素と結合して、エネルギーは安定することが知られている。参考のために、主な金属の1500[K]における酸化物に対する標準生成自由エネルギー $\Delta G$ の値を表3.5 に示す<sup>(16)</sup>。添加元素の中ではバナジウム、クロムが酸化しやすく、モリブデンやニッケルは酸素と反応しにくいことがわかる。比較のために示したアルミニウムも酸化しやすい材料であることが分かる。参考までに比較しやすい白金の値については、標準生成自由エネルギーの値が正で、酸化物になるとエネルギーが増加して不安定な状

態になり、白金は酸化物を生成しにくい金属であることがわかる。

金属は酸化され、酸化物になると体積が変化するが、酸化膜と金属との容積比の大小もファイアボールの表面性状の変化に関係する<sup>(17),(18)</sup>。

表3.4 金属元素と酸素との親和力

Cs>Rb>Li>K>Na>Ba>Sr>>Ca>Mg>Al>Mn>Zn>Mg>Cr>W>W>Fe>Cd>Co>  
Ni>Sn>Pb>H>Sb>Bi>As>Cu>Hg>Pd>Pt>Au>Ir>Rh>Os

表3.6 には金属とその酸化物との容積比を示すが、容積比の値が1 より小さい場合、酸化膜が金属表面を覆うことができないため、完全に表面を保護することが出来ないが、容積比が1 の場合は、金属表面を酸化膜で覆うことができる。ここで関係する添加元素はすべて容積比が1を超えており、酸化物が表面上に広く形成され、一般に酸化膜は固く変形しにくいため酸化膜が薄いとき容易にすべり変形し、厚くなると金属との密着度を保つためにすべり変形しにくくなる。

一方、この性質は酸化膜の破壊、亀裂につながるとされており、表面に形成される酸化膜の機械的性質並びに覆われる状態がファイアボールの特性に関係することとなる。ニッケルは標準生成自由エネルギーが最も低い値であり、酸化膜の体積比も同様に低い値を示し、酸化しにくい表面性状の変化を示しやすい金属と考えられる。表3.6 に示したようにFe (鉄) や鉄の酸化物の容積比をみると、1 より大きい値であるため表面を完全に覆うことができ、かつ酸化膜に圧縮応力が作用すると予想され、形成された酸化膜は変形し、これがファイアボールの表面性状を変化させ、歪んだ形状になる要因の一つと考えられる。また一酸化炭素の発生による内圧の上昇により、表面に亀裂が生じ、かつ穴の発生要因と考えられる。

表3.5 金属の1500Kにおける酸化物に対する標準生成自由エネルギー $\Delta G$

| 金属酸化物                   | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> | FeO    | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | NiO    | MoO <sub>3</sub> |
|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------|--------------------------------|--------|------------------|
| $\Delta G[\text{kcal}]$ | -69.9                          | -76.4                          | -83.9  | -117.6                         | -51.6  | -43.6            |
| 金属酸化物                   | WO <sub>2</sub>                | WO <sub>3</sub>                | VO     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO    | PtO <sub>2</sub> |
| $\Delta G[\text{kcal}]$ | -77.2                          | -74.4                          | -145.7 | -190.6                         | -202.1 | 39.2             |

表3.6 金属とその酸化物に対する容積比

| 金属  | Ni   | Cr                             | Mo               | W               | Fe                             |                                |      |
|-----|------|--------------------------------|------------------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|------|
| 酸化物 | NiO  | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MoO <sub>3</sub> | WO <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> | FeO  |
| 容積比 | 1.64 | 2.07                           | 3.01             | 3.50            | 2.16                           | 2.10                           | 1.79 |

### 3.4 ファイアボールについて

グラインダで鋼材を研削して発生した切りくずは、研削熱、摩擦熱、酸化熱により溶融した火花が表面張力で球形状のファイアボールとなる。あらかじめ床に敷かれたアルミホイル上に落下したファイアボールをカーボンテープに軽く抑えて採集して、そのまま SEM で観察し、各鋼材における特徴について検討した結果を示す。鋼材のファイアボールは数多く観察されるが、鋼材の違いによってファイアボールの大きさ、ボールの形状、表面性状、破裂により生じた穴の有無、穴の数、穴の大きさ、穴の形状などが変化して観察される。

最初に鋼材の違いによるファイアボールの大きさについて検討した結果を図 3.3 及び図 3.4 に示す。各種炭素鋼及び合金鋼について、それぞれ 50 個のファイアボールをランダムに選び、直径の平均値を求めている。図 3.3 及び図 3.4 から分かるように炭素が加わるとともにファイアボールの大きさが増大する傾向を示している。これは炭素含有量が多くなると溶滴内に発生する一酸化炭素の量も多くなり、その結果、溶滴内の圧力が高くなり、ファイアボールが大きく成長するものと推察される。

合金鋼の場合は、210 $\mu\text{m}$  から 300 $\mu\text{m}$  程度の大きさとなっており、炭素鋼のファイアボールより約 2 倍の大きさになっている。これは、添加された合金元素により、温度の上昇、鋼材の物性値の変化などの要因によるものと推察される。

以下では、表 3.1 の材料について、ファイアボールのボールの形状、表面性状、穴の発生の有無、穴の数、穴の大きさ、穴の形状について観察した結果を示す。

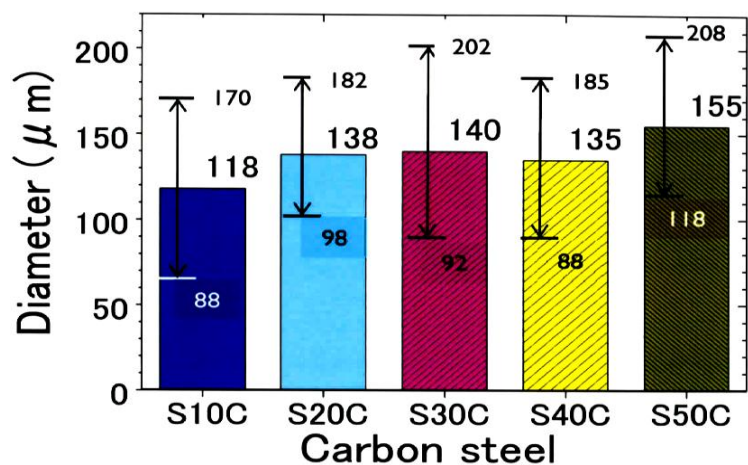


図 3.3 炭素鋼のファイアボールの直径

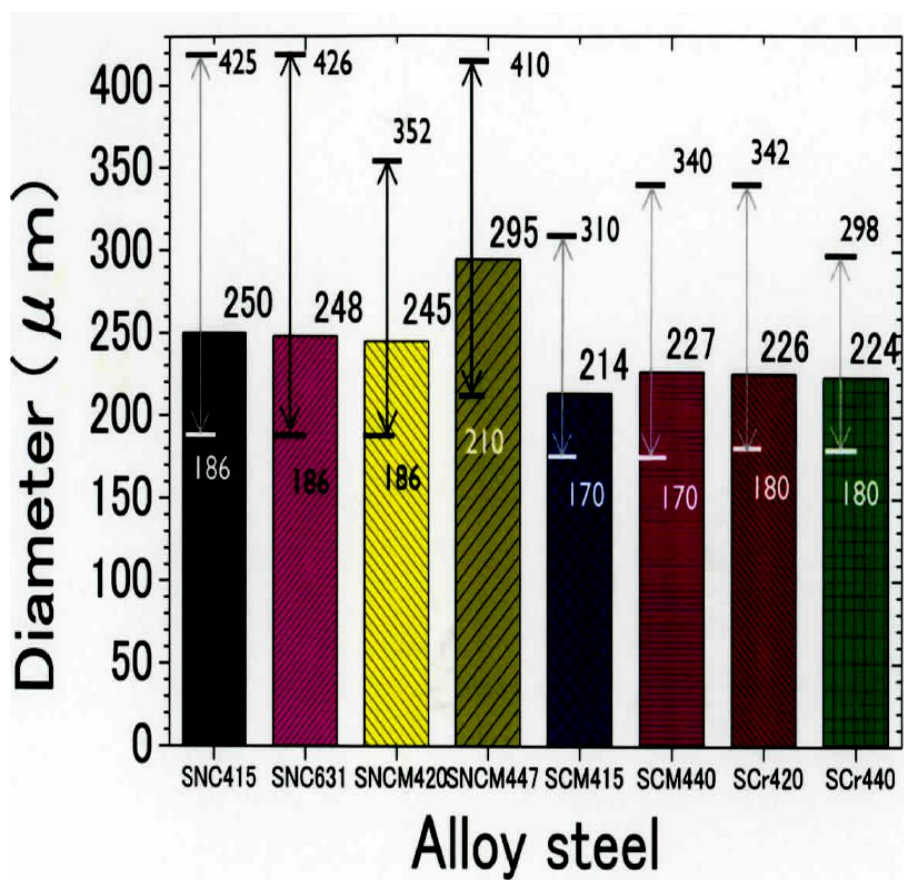


図 3.4 合金鋼のファイアボールの直径

### 3.4.1 炭素鋼のファイアボールとその特徴

図 3.5 に炭素鋼 S10C, S30C, S50C の各鋼材で観察されたファイアボールの表面性状に特徴が現われているもの、及び破裂して穴が生じた特徴的な例の写真を示す。ファイアボールの形状は炭素含有量が少ない S10C では、図 3.5(a)のように穴があき難く真球で現れることが多く、図 3.5(c)のように炭素含有量の多い S50C では、真球形状も見られるが、歪(いびつ)な形状のファイアボールも数多く観察されるようになる。表面性状については S10C の場合、どのファイアボールも表面には筋(すじ)が見られ、亀の子模様の表面も観察される。図 3.5(b)のように S30C の場合、S10C に比べ、ファイアボールの直径は大きくなり、表面も亀の子状の模様が明瞭に現れることが多くなる。穴のあくこともあるが、その数は少なく、あいた場合も穴形状は小さいのが特徴である。また、あいた穴の口からファイアボールの膜は他の鋼材より厚みを感じる。さらに、S50C の場合には、炭素含有量が少ない S10C などと比べるとファイアボールが大きくなり、突起状のものが現われたり、大きな穴があいたりするようになる。また、ファイアボールで形成されている膜は S10C に比べ、膜が薄くなっていることがわかる。表面は亀の子形状がさらに大きくなり、薄片が重なったような荒れた表面性状になっている。

このように炭素含有量の増加とともにファイアボールの形状は大きくなり、形状も歪となり、表面も荒れ、かつ破裂で生じた穴も大きくなるという特徴がある。炭素含有量が増加するとファイアボールが大きくなるが、溶滴内に発生する一酸化炭素ガスの量が増えることにより内圧が高くなり、ファイアボールが大きくなると推察される。これには、熱膨張係数による影響と酸化膜の機械的強度の 2 つの要因が考えられる。酸化膜の機械的強度が低い場合、ファイアボール内の圧力が高い場合には、内圧の上昇によりファイアボールの酸化膜が突き破られて穴があいたり、酸化膜の弱い部分を内部から突起状に押し出したりするようにファイアボールの形状や表面性状を変化させることは明らかである。また、炭素含有量が少ない場合、酸化膜が厚くなることによりファイアボールが増大しなかったものと推察される。さらに、ファイアボールの穴のあき方を見ても炭素含有量が少ない場合は延性的な変形をした穴となり、炭素の量が多くなると表面は薄片が重なったような表面性状を示すようになる。



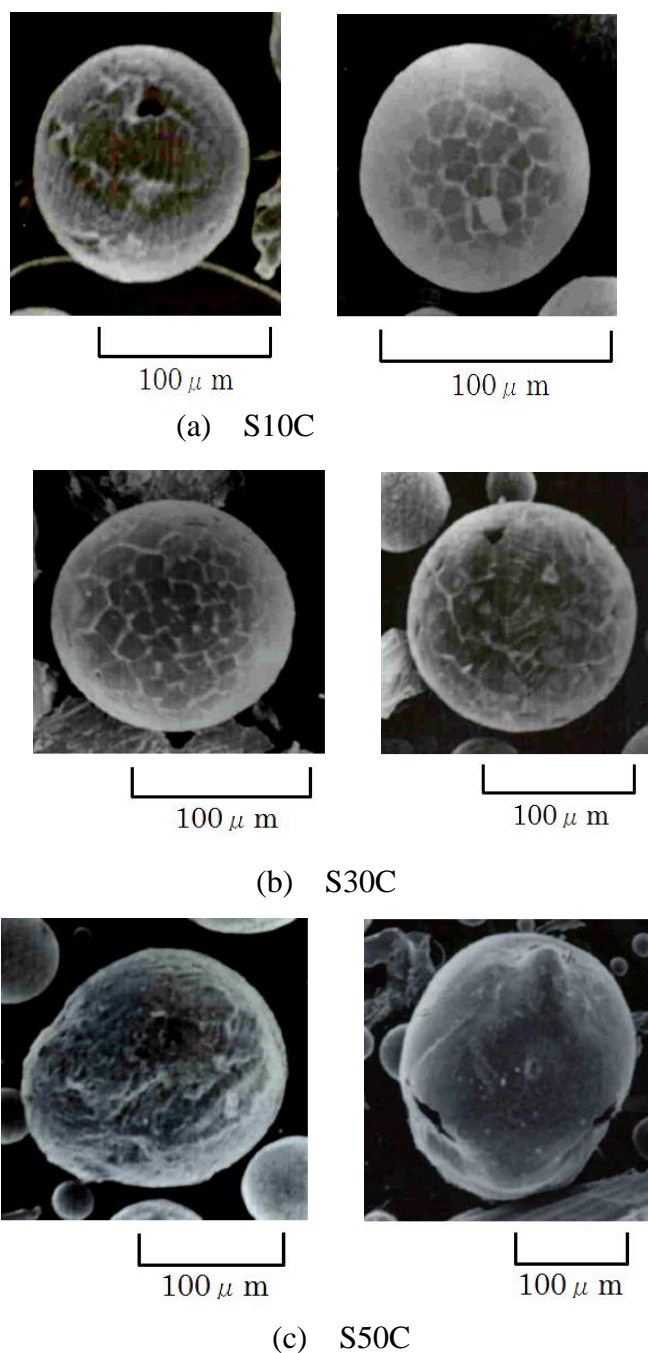


図 3.5 炭素鋼のファイアボール

炭素鋼の酸化には、主成分の鉄が大きく寄与しており、 $570^{\circ}\text{C}$ 以上では、 $\text{FeO}$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ の3層が生成され、最下層は $\text{FeO}$ で95%、中間層は $\text{Fe}_3\text{O}_4$ で4%、最外層は $\text{Fe}_2\text{O}_3$ で1%という相対的な割合になっていることが示されている<sup>(19),(20)</sup>。最外層の $\text{Fe}_2\text{O}_3$ は、構造上剥がれやすく隙間の多い構造であり、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ は構造上柔軟性を示し、しなやかな構造体で不動態の酸化被膜並みの緻密な膜を

形成するため  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  が形成される場合、内部は保護されると考えられる<sup>(21)</sup>。いずれの単体酸化物のビッカース硬度も温度の上昇に伴って低下していくが、図 3.6 のように硬度は  $\text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_3\text{O}_4 > \text{FeO}$  の順となっており<sup>(22)</sup>、最下層の  $\text{FeO}$  が最も柔らかい。また単体酸化物のヤング率の値も図 3.7 のように室温から約 500 °C までは、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{FeO} > \text{Fe}_3\text{O}_4$  となっている<sup>(23)</sup>。炭素鋼のファイアボールの最外層の  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  は硬度ならびにヤング率の値は高いので、外力によるファイアボールの形状変化への影響は少ないと考えられる。しかし  $\text{FeO}$  は 550 °C を超えると急激にヤング率が低下する。また炭素鋼の物性値の中で、熱膨張係数は炭素含有量が増えることで小さくなることがわかっている。表 3.3 に示したように三つの酸化物の熱膨張係数は異なるので、ファイアボールの収縮時に酸化膜間に隙間が生じ、表面性状に影響すると考えられる。また、様々な外力、酸化膜同士の密着性などの影響により、薄片状の表面となったり、酸化膜間に欠陥部分が生じ、その部分の強度が弱まることで、溶滴内の内圧が表面層を押し破り、穴があいたり、破裂して歪な形状を示すようになると推察される。

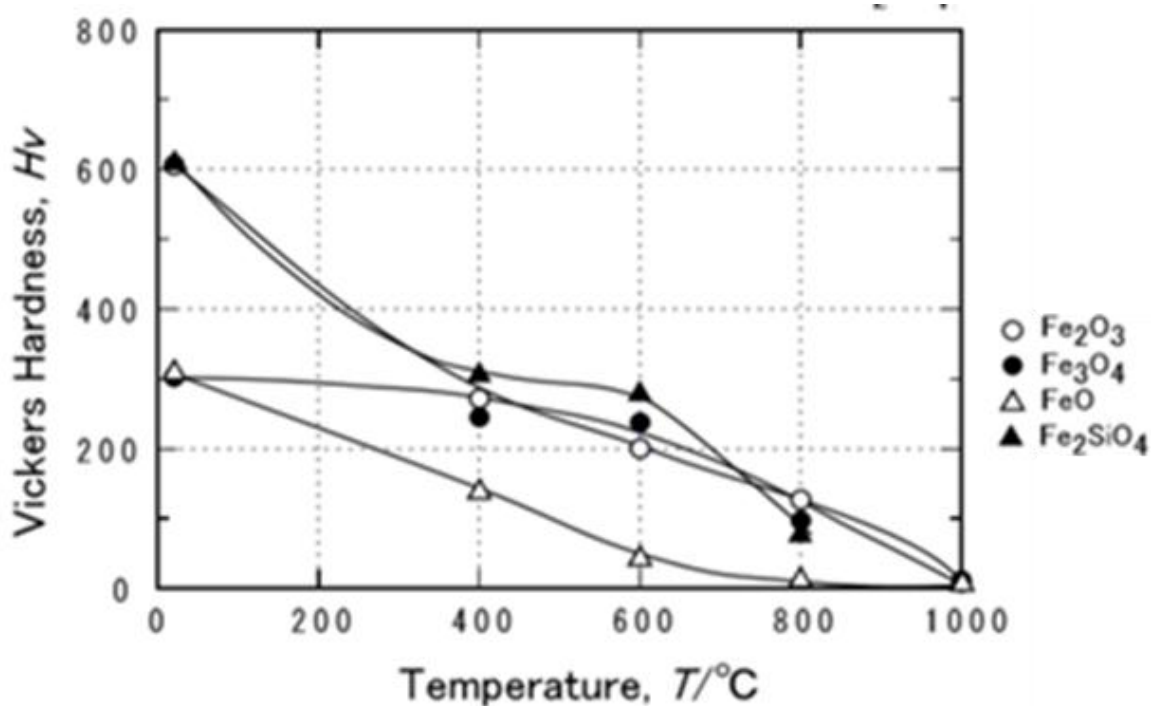


図3.6 各種酸化物単体の高温硬度

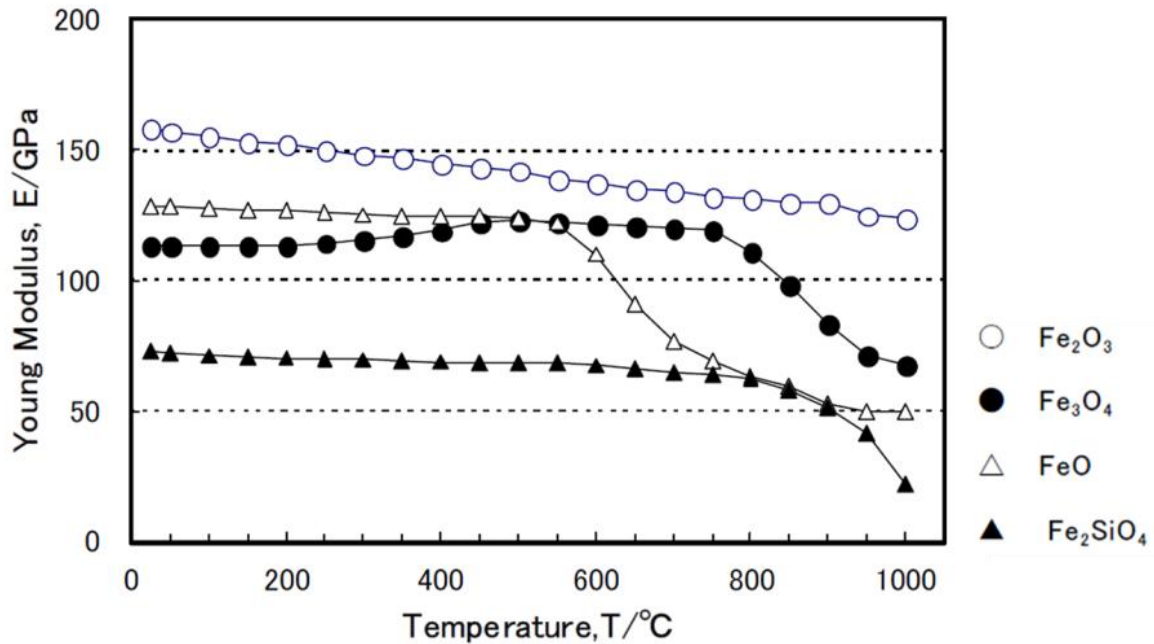
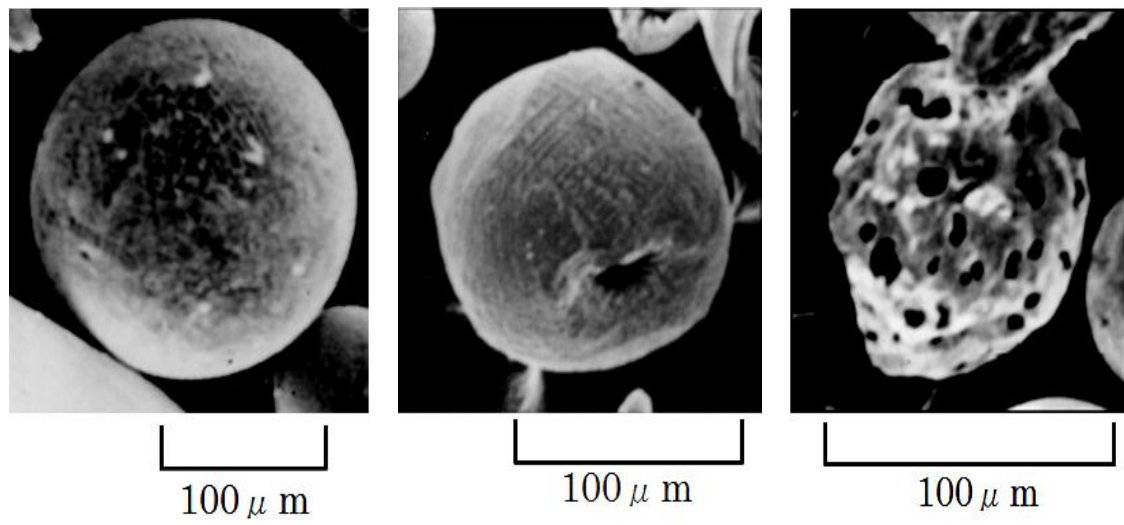


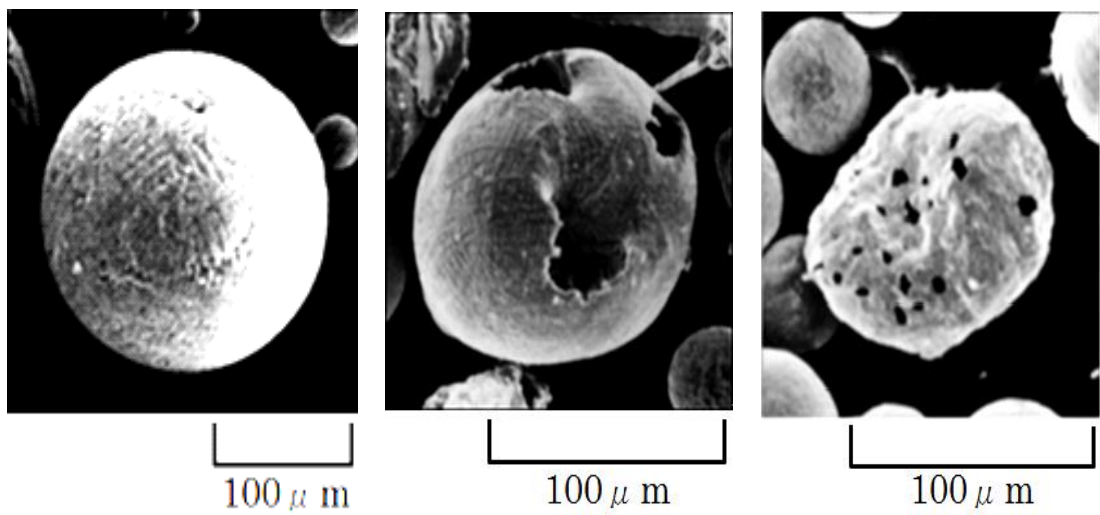
図3.7 鉄及び酸化鉄のヤング率

### 3.4.2 合金鋼のファイアボールとその特徴

図3.8(a), (b)にクロム元素が添加されているクロム鋼鋼材のSCr420 とSCr440 のファイアボールを示す。ファイアボールの成長程度により、ほぼ真球形状で現れるファイアボール、穴が数個あき、その穴があいたために少し収縮したファイアボール、破裂して多くの穴があき、形状もゆがみ、萎んだような形状になって現れるファイアボールなどが観察される。ここで取り上げた二つのクロム鋼におけるファイアボールの特性の明確な違いはなく、ほぼ同じ傾向のファイアボールの性状を示している。クロムは今回検討しているすべての鋼材に含まれているが、ここで取り上げた1%以上のクロムを含むクロム鋼鋼材のファイアボールの場合は、図3.8 に示すように穴があく前の段階までは真球形状が多く見られ、大きく成長して破裂し、穴が多くあいた状態では、小さい穴が無数にあき、ガスが抜けて潰れたような形状を示している。大きな穴があいた場合には、外から棒などでブリキ板に穴をあけたような、穴の部分が延性的な変形を示す例も見られる。表3.4 に示したようにクロムの親和力は鉄に比べ高いため、鉄より先に酸化されて、Cr-Fe 化合物の酸化物 $\text{FeCr}_2\text{O}_4$  と鉄の複数の酸化物が生成され、図3.9 に示すファイアボールの酸化モデルのように、内側の表面はクロムを含む酸化膜、外側は鉄の酸化膜となる<sup>(24)</sup>。これらが金属表面を均等に覆った場合、非常にすぐれた保護酸化膜を形成すると考えられ、炭素鋼より膜は強



(a) SCr420



(b) SCr440

図 3.8 合金鋼のファイアボール

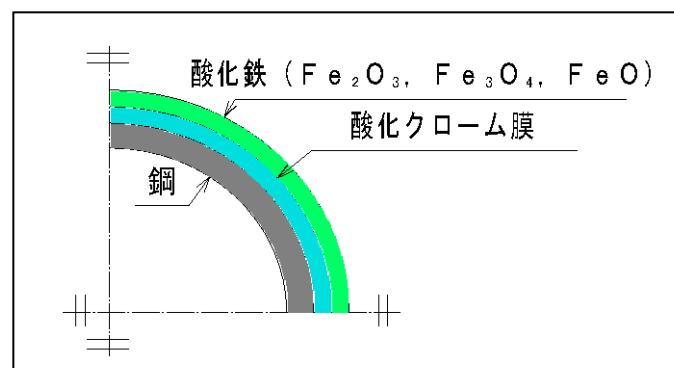


図 3.9 クロム鋼の酸化膜形成モデル

固になると推察される．表3.6 に示した容積比も1 より大きいため，熔融したファイアボールの周りを完全に酸化膜で覆うこととなる．さらに表3.3 に示したクロムの熱膨張係数も，鉄に比べて低いので，膜が内圧によって伸びることがなく，成長していくと穴があきやすくなると推察される．さらにクロム鋼の場合，クロム酸化物の内側の膜よりも，酸化鉄が形成されている外膜層の方が熱膨張係数の値が大きく，熔融されたファイアボールが徐々に冷やされていく際，ガスによる内圧の他に2 層ある酸化層の外側の膜から内側の膜の方向に熱膨張の差によって圧力が発生すると考えられる．外膜の収縮力が大きいため，冷やされる過程で，膜と膜の間にすき間が生じることはないと考えられ，密着度も増し，保護性が増すと考えられる．クロム酸化層は内圧の他に，熱膨張の違いにより生じる外力も受けているため，2 層の強固な酸化膜により，ファイアボールが破壊され難かったと考えられる．また，ファイアボールの外からあけられたような穴が観察されたのは，熱膨張係数の違いにより収縮力が生じ，酸化膜が耐えられずに穴があいたものと推察される．実際のファイアボールは真球形状で穴があいていない形状も見られた．クロムのヤング率は鉄に比べて高いため，酸化膜も強固であると考えられた．また引張強さもクロムの値が鉄より大きいため，内圧に耐える酸化膜を形成していると推察される．さらに，クロムの延性も伸びの値も高いためクロムを含んだ鋼材の酸化膜は内圧に耐えられる強度と粘性的な性質を持っているとみなせる．さらにニッケルを添加したニッケルクロム鋼であるSNC415とSNC631のファイアボールを図3.10に示す．図3.10から観察されるような真球に近い形状で現れる場合が多いが，表面はクロム鋼より少し粗い表面となっており，表面には薄片が層状となったようなファイアボールも現れる．図3.10(b) にSNC631の画像を示すが，この右側の画像のように，ファイアボールが大きく成長して穴があき，歪な形状となる場合もある．この段階となるファイアボールはあまり観察されない．ニッケルが添加されると表面が粗くなる傾向にあるが，ファイアボール全体としては，クロムにニッケルがさらに添加されると変形しにくくなり，強さも少し増したように思われる．

Fe-Ni 系でニッケル量が少ない合金では， $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ， $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ， $\text{FeO}$  の酸化鉄が生成され，ニッケルの量が増加すると， $\text{FeO}$ 層の厚さが減少し，ある程度以上になると，消失することが知られている<sup>(25)</sup>．ニッケルと鉄は親和力との関係で鉄が選択的に酸化されて， $\text{FeO}$  層を生成するが，酸化されると鉄が主に選択的に酸化され，酸化物に接する合金表面にニッケルが凝縮される．ニッケルが添加されたSNC，SNCM鋼材で形成されるファイアボールでは，薄片層が重なったような粗い表面が形成される．ニッケルが添加された鋼材の酸化膜は主にニッケル酸



化物と鉄酸化物の複数層で構成され、ニッケルは酸化されにくい、酸化されると緻密な酸化物が形成されるため、酸化は進行しなくなる。したがって、一酸化炭素ガスの発生も抑えられ、発生気体による内圧が酸化膜を突き破るほどの力が得られず、ニッケルが添加された鋼材では、ファイアボールの穴はあきにくいと推察される。

表3.5 に示した金属の酸化物に対する標準生成自由エネルギー $\Delta G$  の値からも、ニッケルは酸化されにくいことがわかる。また、表3.6 のニッケル酸化層の容積比は 1.6 であり、1 より大きいため、酸化される場合には、ファイアボール全体を酸化膜で覆うものと予想される。さらに表3.3 よりニッケル酸化物の熱膨張

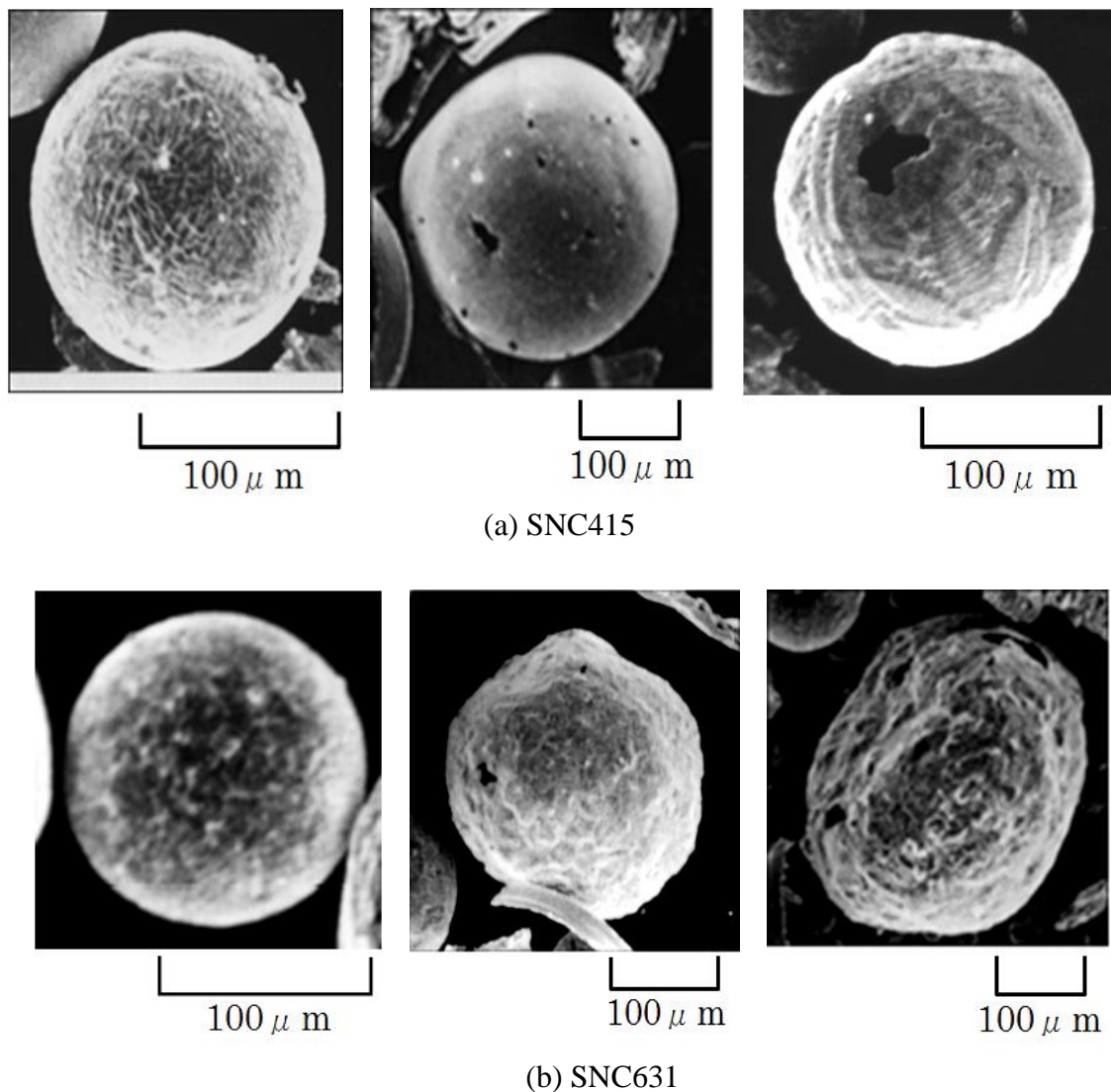


図 3.10 低合金鋼のファイアボール (SNC)

係数の値は大きく、酸化膜は内圧の上昇に伴い変形し、ファイアボール内の空間が広がることとなり、酸化膜を破ることなくファイアボールが大きくなると推察される。図3.4 に示した合金鋼の平均直径からも、ニッケルが含有されている合金鋼のファイアボール(SNC415, SNC631, SNCM420, SNCM447) はニッケルが含有されていないファイアボールに比べ直径が大きいことがわかる。また、ニッケルの酸化膜が冷えた後も金属と酸化物の熱膨張係数の比がほぼ同じであることから、そのままの状態を保持すると考えることができ、ファイアボールが熱的变化により縮小することなくファイアボールが大きいままに留まっているものと推察される。SNC鋼の表面性状については、ニッケルとクロムの両方の性質が関係するものと予想され、金属と酸化物の熱膨張係数の差が大きいクロムの影響が大きく、そのため冷却過程での温度差に關係する熱膨張の差により生じると予想される薄片状の酸化膜が表面に生成されるものと考えられる。

図3.11はクロムモリブデン鋼のファイアボールである。この材料の場合、ほとんどのファイアボールに穴があき、表面がかなりなめらかとなるのが大きな特徴である。穴が数個生じており、その大きさも図3.11(a)に示しているように30  $\mu\text{m}$  から100  $\mu\text{m}$  程度であり、かつ花瓶の口のような穴形状を示す場合がある。図3.11(b)のSCM440 の場合は、極度に荒れた表面を持ったファイアボールも観察された。モリブデンが含まれると、表面は滑らかになる傾向があるが、ここでSCM415 とSCM440 の違いについては、炭素含有量が多いか少ないかであり、SCM440 の場合、表面が薄片状に重なったような表面が現れる場合や、なめらかな表面となるファイアボールも現れる場合があり、モリブデンだけでなく炭素含有量が表面の性状に關係するようである。図3.11(a)に示したように、モリブデンが添加されているSCM415 のファイアボールを見ると、表面が滑らかで皺もない。大きな穴があいた場合、穴の周りには変形しており、延性的な性質を示している。元素成分は、ほとんど同じであるが、図3.11(b)の炭素含有量が多いSCM440 になると表面が荒れ、簡単に剥離しそうな層状の表面を呈するようになっている。

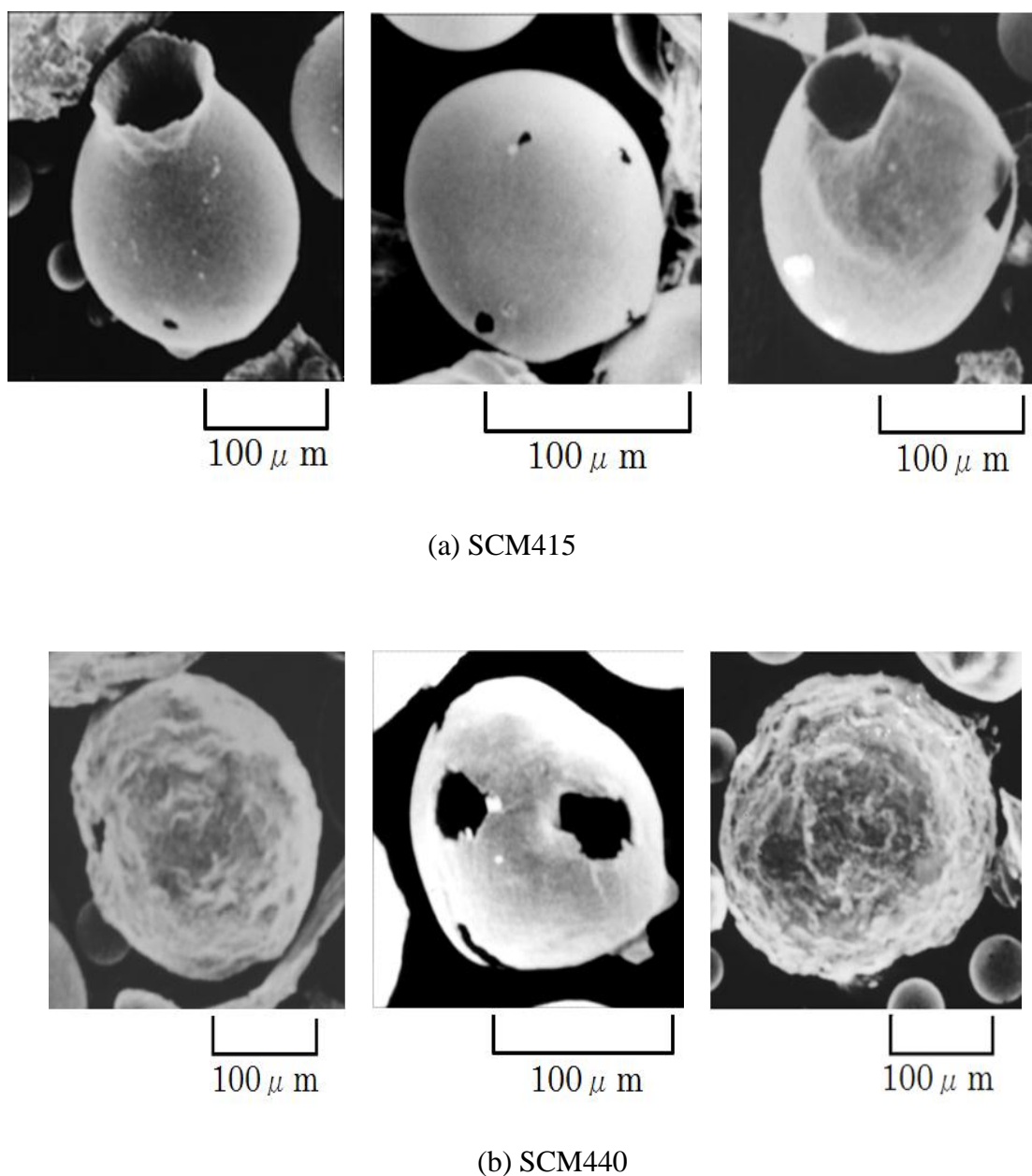


図 3.11 低合金鋼のファイアボール (SCM)

図3.12に、ニッケルクロムモリブデン鋼のファイアボールを示す．図3.12(a)のSNM420 の場合，表面が滑らかで比較的眞球に近い形状となっているが，炭素含有量が多いSNM447 になると薄片層状の荒れた表面を呈するようになっている．添加元素がほぼ同じ場合には，炭素含有量の多少が表面性状に影響することがわかる．

ニッケルクロムモリブデン鋼のファイアボールは，ニッケルクロム鋼と比べ



ると、穴が多く観察され、小さな穴が多くあく場合もあるが、少し大きめの穴があくこともある。表面の性状は、滑らかとなる場合や薄片が重なったうろこ状となる場合、マスクメロン肌の場合など、複数の表面性状が観察される。またSNCM447では、真球形状のファイアボールは減り、歪な形状のファイアボールが多く見られる。表面はかなり粗くなり、クレータ状に見える部分も存在する。ニッケル、クロム、モリブデンの3種類の元素が添加される鋼材の場合、個々の元素の影響が作用し、ファイアボールの表面性状に複数の性質が現れるものと考えられる。

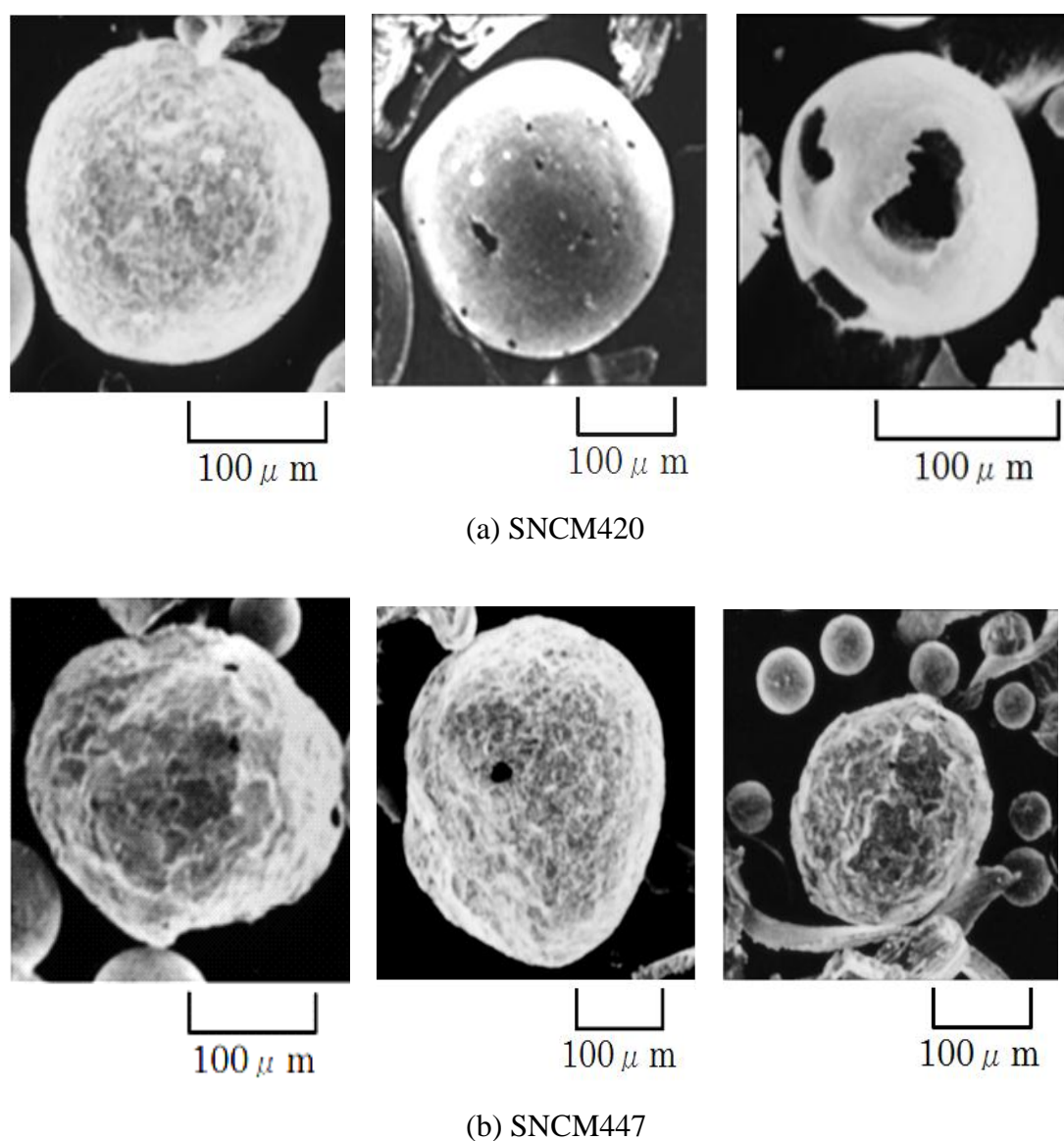


図 3.12 低合金鋼のファイアボール (SNCM)

Fe-Ni-Cr-Mo 鋼及びFe-Cr-Mo 鋼は酸化されると、複数の酸化層が生成され、その中の酸化物の一つにモリブデンが含まれた $\text{MoO}_3$  がある。表3.2 を見ると分かるように、この物質の融点は低く、モリブデン単体は高融点であるが、モリブデンが酸化されると、融点が低くなる特徴がある。このモリブデンの酸化物が熔融してファイアボールの全面を覆うような状態の場合、滑らかな表面になるものと推察される。表3.3 に示したように、モリブデンの熱膨張係数は低い値を示すため、酸化膜は熱による伸びが少なく、溶滴内で発生した気体による圧力が酸化膜の強度よりも高くなるため、穴があいたものと推察される。また添加されているモリブデン、鉄、及びクロムの熱膨張係数の値を見ても差が大きく、酸化膜間にせん断応力が生じることにより、表面が薄片層状になったものと思われる。

SNCM 鋼及びSCM 鋼のファイアボールに生じた穴の数を比較すると、酸化されにくいニッケルが含有されているSNCM 鋼の方が穴の数は少なかった。これは、ニッケルが含まれるモリブデン2 元合金の870 °Cにおける硬さの値から、2 元合金の硬さが高くなることが示されており<sup>(26)</sup>、ニッケルが含まれることで硬さが増し、SCM鋼より穴があき難くなったものと推察される。

### 3.4.3 工具鋼のファイアボールとその特徴

ここでは、硬さ、靱性、耐摩耗性、切れ味などが要求される切削工具及び塑性加工用工具に用いられる工具鋼について検討する。

炭素工具鋼の例として、図3.13(a)にSK85 を、図3.13 (b)にSK105 のファイアボールを示す。SK85 のファイアボールの多くは、ほぼ真球形状に近い状態で現れ、ファイアボールが大きく成長する場合には、穴があくようになる。穴があいた場合でも、しばむこともなく真球に近い形状を保っている。表面性状については、穴があかない真球形状のファイアボールは表面が亀の子模様となっている。これは炭素鋼S30C で確認された表面性状と類似している。図3.13(b)のSK105 のファイアボールの場合も穴があかない場合はSK85 と同様、真球形状で現れる。二つの炭素工具鋼の成分はほとんど同じであり、炭素成分がSK85 の場合、0.8~0.9%、SK105の場合、1.0~1.1%であり、SK105 の方が少し多くなっている点が異なるだけである。したがって、二つのファイアボールの特徴もほとんど同じとなっている。炭素成分が少し多いSK105 の場合、穴があいたファイアボールは、ゆがんだ形状を示し、穴も少し大きな形状となっている。表面性状については、真球形状のファイアボールでは、SK85 と同様に亀の子模様を示し、穴があく程度までファイアボールが大きくなった場合には、穴の大きさ

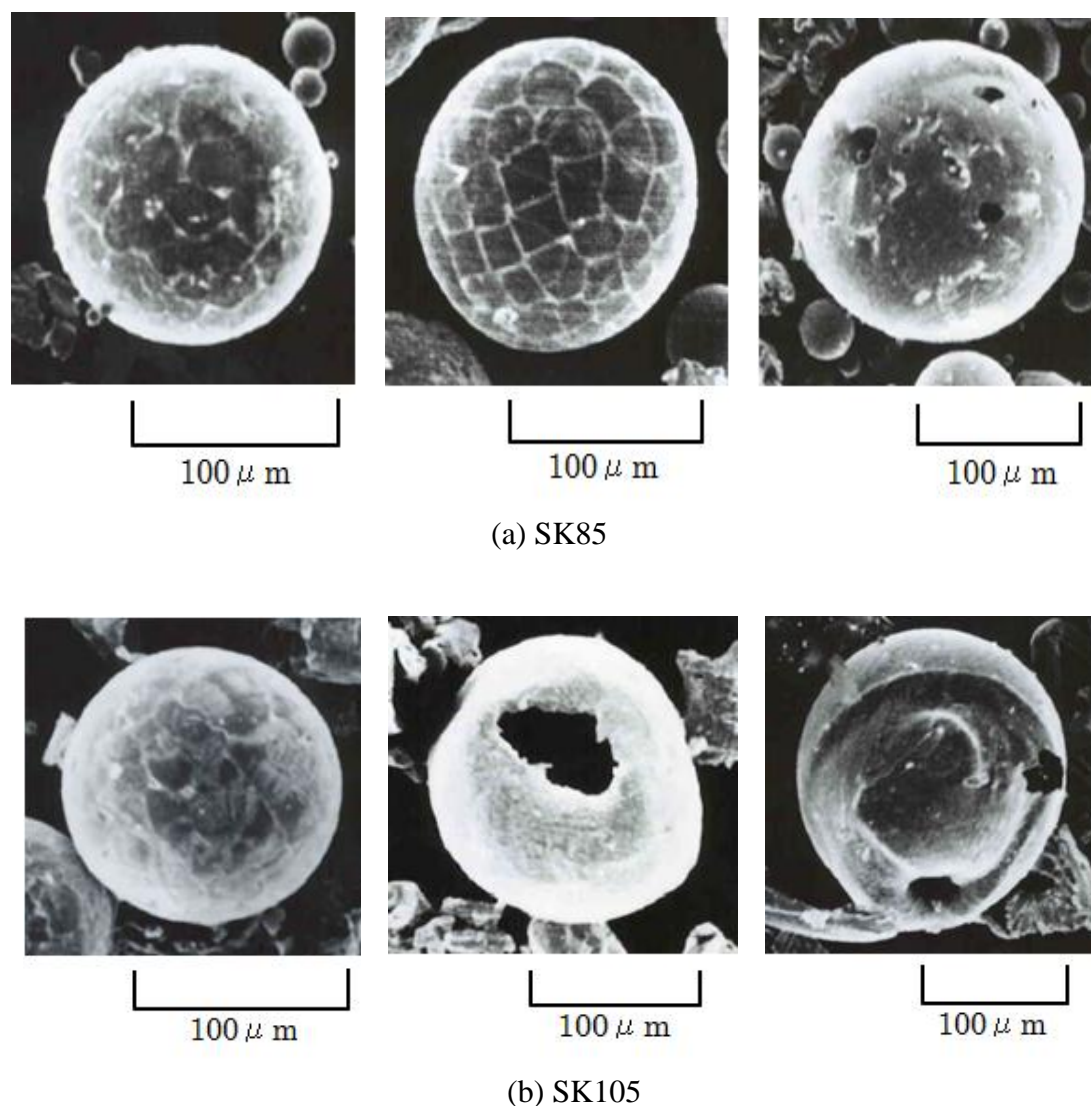


図 3.13 工具鋼のファイアボール (SK)

は SK105 の方が大きくなる特徴がある。

つぎにタングステンが添加されている合金工具鋼である SKS4, SKS2 及び SKD4 のファイアボールを図 3.14 に示す。合金工具鋼は、炭素の他に、ニッケル、クロム、タングステン、モリブデン、バナジウムなどが加えられているため、炭素工具鋼よりも機械的強度は向上しており、焼入れ性を高めて、耐摩耗性を向上させた材料である。なお、表 3.1(c)に化学成分を示した。

図3.14から一見して分かるように、ファイアボールの大きさは100  $\mu\text{m}$  を超えており、穴も数多く発生している。ファイアボールの表面は大きな皺模様であり、著しく荒れており、その厚さもファイアボールが大きくなっているため、

薄くなっているように見える。比較すると分かるように、ファイアボールの表面性状は大きな皺が表面を覆っており、小さな穴が数多く生じる特徴を示している。ここで炭素含有量が0.5%程度のSKS4とS50C、及び1%程度のSKS2とSK105をそれぞれ比較してみると、S50CとSK105の場合には、ファイアボール形状が歪でなく、表面に皺もなく、あまり荒れてない。一方、SKS2とSKS4の場合には、表面は皺となり激しく荒れた様子を示している。ここで取り上げた合金工具鋼には、機械的強度を向上させるためにタングステンが添加されている。添加元素としてタングステンが含まれると、鋼材のファイアボールには多くの穴があき、かつ表面にも皺が多く、著しく荒れた表面となるという特徴がある。SKD4は他の2つの鋼材より多くのタングステンを含んでいるため、最も激しく変形しており、右図の穴が空いている部分の形状から分かるように、脆性的な性質が伺える。表3.2に示すように、タングステンの融点は3400℃程度と非常に高く、弾性係数、引張強さなどの機械的性質についても高い値を示し、高温強度も高い。モリブデンを含めタングステンは、延性-脆性遷移現象を示す高融点金属の特徴があり<sup>(27)</sup>、遷移温度を境に高温側では延性、低温側では脆性を示す。また、もう一つの特徴として、降伏応力は大きな温度依存性を持ち、温度が下がるに従い急激に応力が高くなる傾向を示す。したがって遷移温度以下では、降伏応力の方が破壊応力より大きくなり、脆性的破壊を示し、遷移温度以上では、降伏応力の方が破壊応力より低くなり、延性的性質を示すようになる。タングステンが添加されている鋼材の溶融したファイアボールの温度が下がる過程において、ある遷移温度より温度が下がると延性的性質が失われ、力が作用することによって、ファイアボールが変形するようになり、表面に大きな皺が発生したと推察される。

さらにモリブデンが添加されている合金鋼であるSKD61とSKT4のファイアボールの例をそれぞれ図3.15(a)、図3.15(b)に示す。SKD61のファイアボールは真球形状が多く現れ、穴もいくつかあいているが、穴の大きさは小さく、大きい穴の発生は少ない。また、表面は薄片が重なったような性状を示している。SKD61には、クロムが5.2%と多く含有されているため、クロム鋼で見られたように、真球に近く、薄片が重なったような表面のファイアボールとなり、かつファイアボールに厚みを感じられる。図3.15(b)のSKT4では、歪んだ形状のファイアボールが多く、小さい穴があくことがあるが、穴の形状は小さく、穴の数もそれほど多くはない。表面性状は、薄片が重なったようになっており、すべてのボールに皺が見られ、ファイアボールは歪んでいる。このように合金工具鋼SKT4の場合、ファイアボールに穴の発生が少なく、歪な形状を示している。

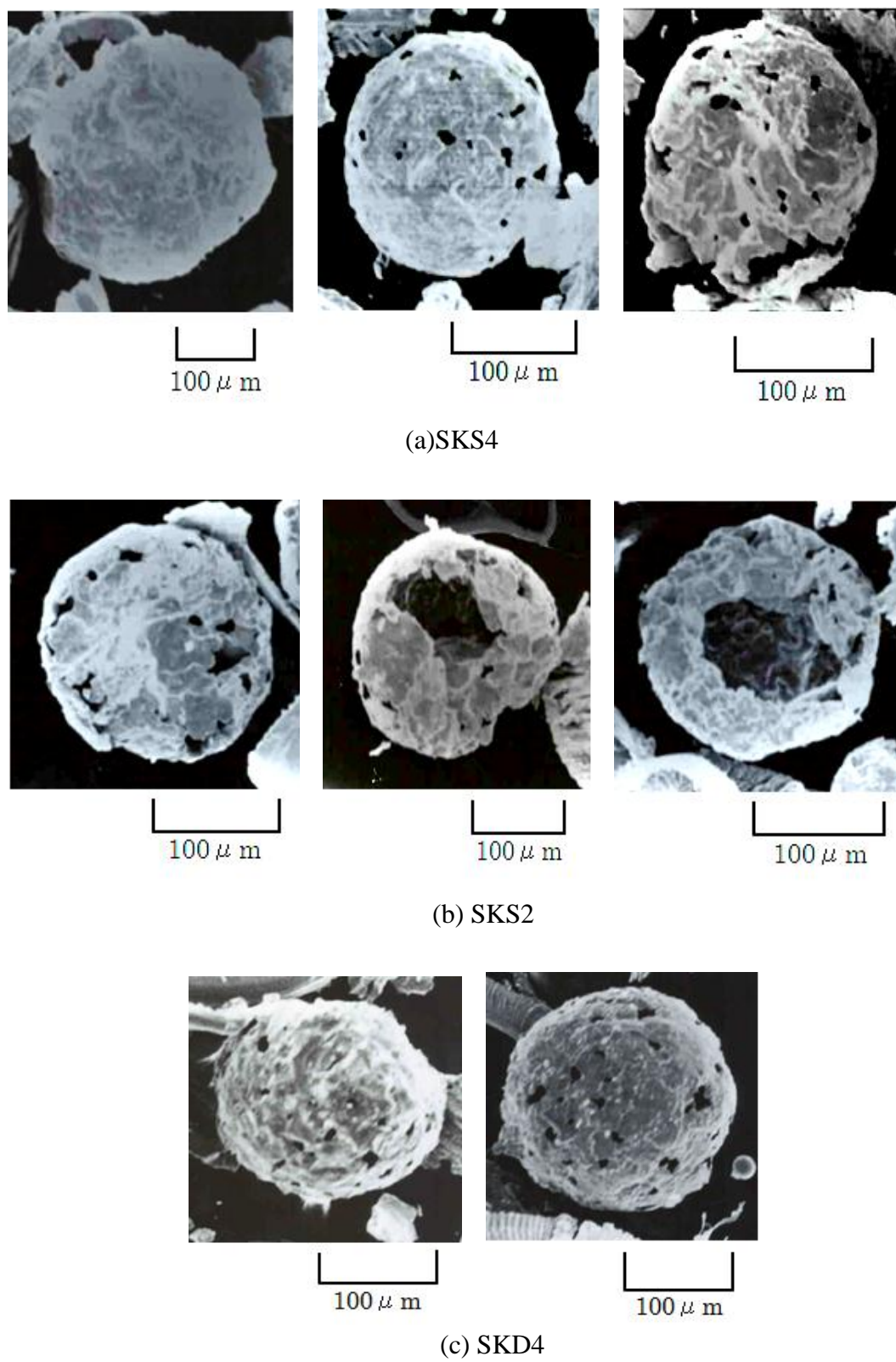


図 3.14 合金工具鋼のファイアボール (SK/SKD)



これは, SKT4 には, ニッケルが1%以上と他の工具鋼より多く含まれており, その影響を受けやすいと考えることもできる. SKD61及びSKT4 はモリブデンを含み, 特にSKD61は1%以上のモリブデンと, 5%程度のクロム元素も含まれている. そのため比較的安定な機械的性質を示す鉄鋼材料であり, 合金工具鋼の中では比較的安定した形状のファイアボールである. 上記のように, 穴の発生ならびに表面性状の変化には, 添加元素が大きく影響していることが推察される.

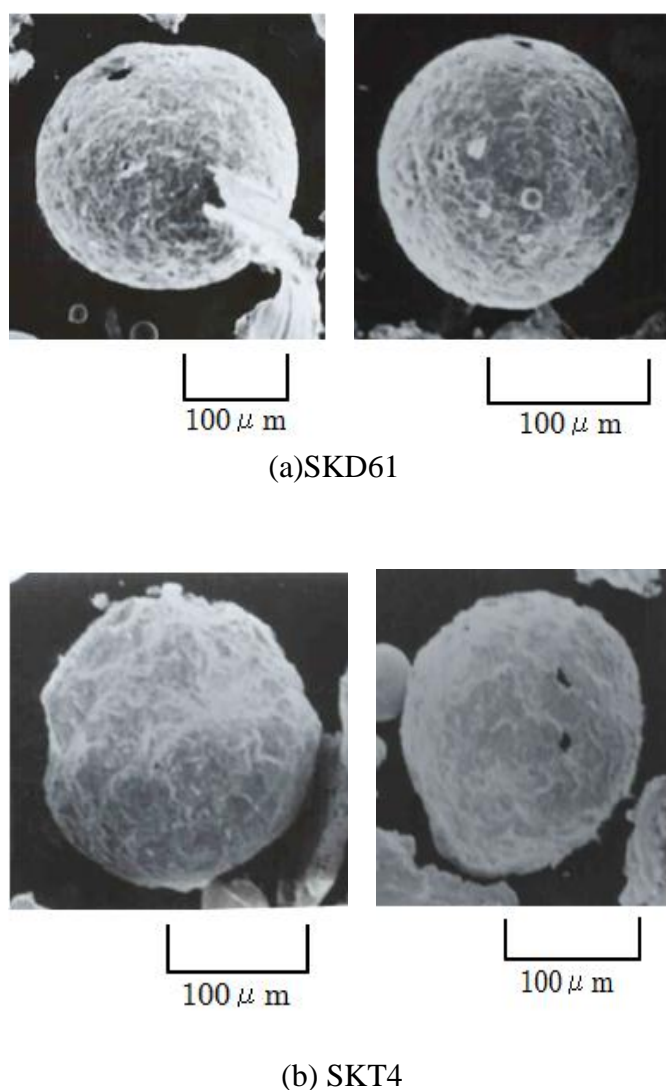


図 3.15 合金工具鋼のファイアボール

### 3.5 おわりに

ここでは、SEMによるファイアボールの画像解析からその特性を明らかにし、含まれる元素の性質とファイアボール形状との関係を実験的に検討した。火花試験という簡便な方法から得られるファイアボールを用いているが、いくつか特徴的な性質が得られている。鋼種鑑別という観点からは、次に示す特徴的な変化をもとに推定することが可能である。

- (1) ニッケルが含まれている場合には、薄片層状の表面性状を示し、穴があきにくい。
- (2) クロムが多く含まれている鉄鋼材料では、ファイアボールが大きくなり、破裂したファイアボールに多くの穴があき、表面には、筋が現れる。ファイアボールの形状としては真球が多く、延性的な性質が現れている。
- (3) モリブデンが含まれている鋼材のファイアボール表面は、滑らかである。
- (4) タングステンが含まれている鋼材のファイアボールは、表面が皺状となり、多くの穴があいている。

以上のように、ファイアボールの定性的な変化から材料鑑別が可能な鋼材並びに添加元素の種類の解析が可能であり、従来の方法と組み合わせることにより、鋼種鑑別の一つの方法として利用できる。

火花とファイアボールの鑑別性能と精度については、依然として人の感性に依存するため、今後の課題として、定量的に鑑別する方法を明らかにする必要があると考えられる。

## 第4章 研削点温度に関する実験

### 4.1 はじめに

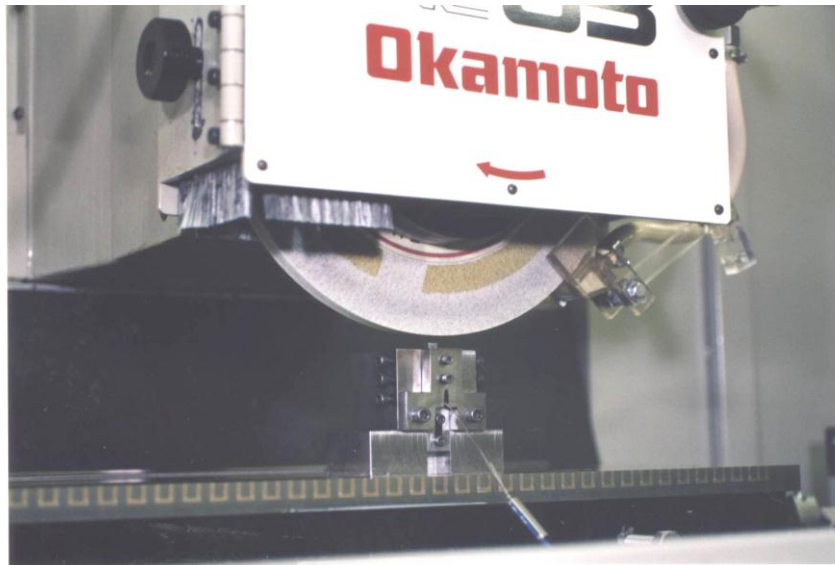
切削，研削加工のような除去加工では，材料を加工して製品にする際，多量の熱が発生する．特に，研削加工では，負の砥粒切れ刃すくい角によって高速で材料を除去するため，研削点温度が高くなり，研削油剤を用いて工作物を冷却しない場合には，研削焼け，研削割れなど，工作物の表面性状に重大な影響を及ぼす<sup>(28)</sup>．この熱の発生及びその影響をいかに少なくするかが最終仕上げとしての製品の表面品位を左右する．

本章では，CBNホイールによる研削が，鋼材の火花試験及びファイアボールのSEM観察を通して，有効か否かを研削点温度の観点から検討している．また，超砥粒ホイールとして注目されているCBNホイールが一般砥石に比べて，極度に長寿命<sup>(29), (30)</sup>である理由を研削温度の立場から検討している．特に，砥粒切れ刃が直接に，工作物を研削する点，すなわち研削点の温度に注目し，研削点温度状態が砥粒切れ刃の維持に及ぼす影響を明らかにしている．

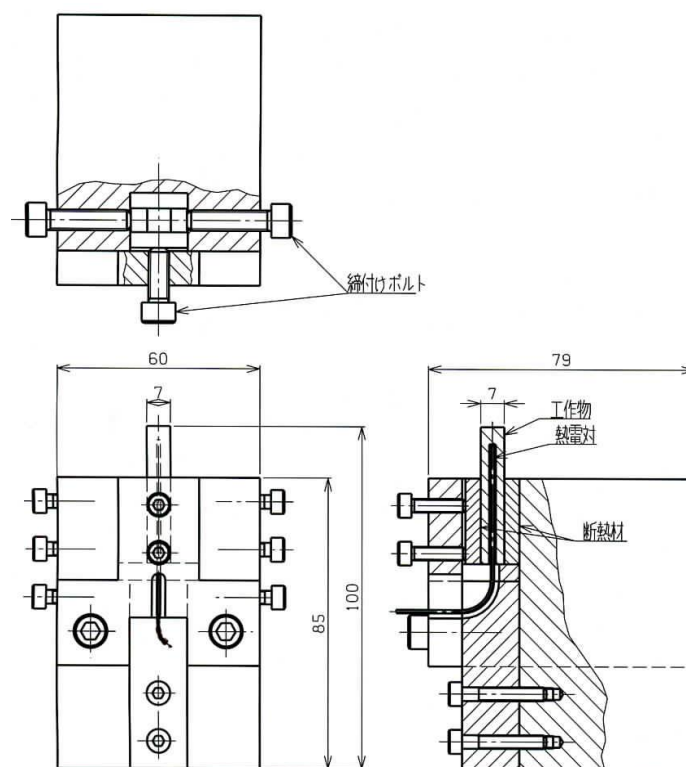
### 4.2 実験装置及び方法

本実験では，図4.1に示すCNC 精密成形研削盤(㈱岡本工作機械製作所製CNC-63DX形)を用い，この図に示すように，4mm×4mm×30mmの工作物を取付け具に取付け，これを電磁チャックでテーブルに固定し，Y方向に連続的にダウンフィードを与え，工作物内部に埋め込んである熱電対の先端に到達するまで研削を行っている．この時，工作物と取付け具の間には，断熱材としてセラミックスを介して熱拡散を防止している．研削点温度を測定するために，シース熱電対ST6-K-1.0を工作物に埋め込んで，熱電対の先端まで研削している．工作物と熱電対とが接触する部分を研削した瞬間を研削点温度としている．巻き付けノズルを使用して研削油剤を研削点に限りなく供給できるように配慮している．





(a) 平面研削盤に固定した工作物取付け具



(b) 熱電対を組込んだ工作物の取付け状態

図 4.1 工作物の取付けおよび研削温度測定状態

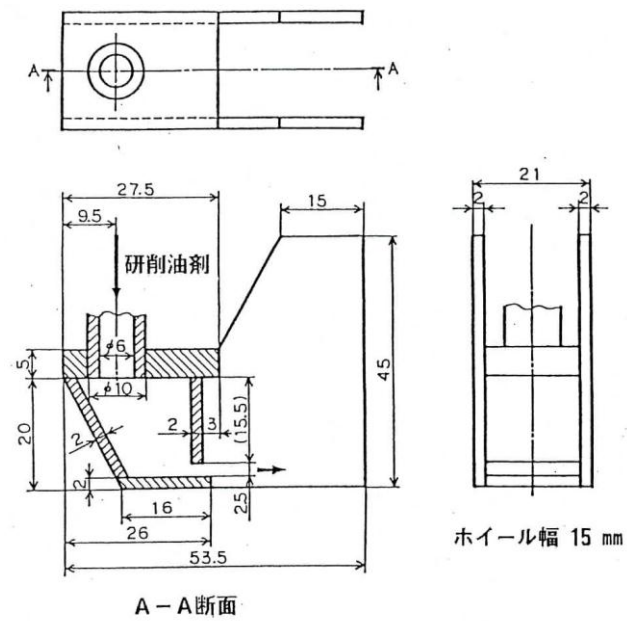
使用した砥石は、一般砥石のWA46H7V、SN80J7V10W及び超砥粒ホイールのCBNホイールCBN (Type I )80/100W<sub>1</sub>200VN4 である。工作物は、一般的に自動車部品などによく用いられる焼入れ鋼 SCM 435(HRC48)を使用している。主な研削条件を表4.1に示す。

ドレッシングには、角錐形の単石ダイヤモンドドレッサを用い、WA砥石及びSN砥石は、一般砥石に用いられる直径 $\phi 20\mu\text{m}$ を3回、直径 $\phi 10\mu\text{m}$ を2回の切り込みを、またCBNホイールは、CBN砥粒の硬くてもろい特性を考え、直径 $\phi 5\mu\text{m}$ を2回の切り込みを施して実験を行っている。

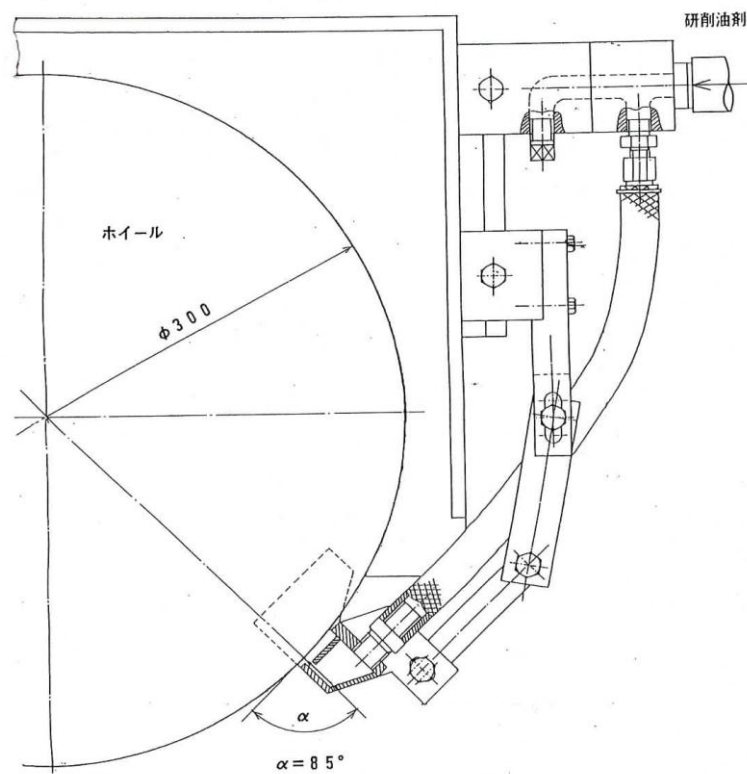
さらに、研削油剤供給法として、図4.2に示す巻き付けノズル及び比較のために、一般に用いられている通常ノズルを用いている。

表4.1 研削条件

|              |                          |   |
|--------------|--------------------------|---|
| 研削砥石及びホイール   |                          | CBN(Type I )80/100W <sub>1</sub> 200VN4<br>WA46H7V<br>SN80J7V10W  |
| 工作物          |                          | SCM435(HRC48)   |
| 砥石周速度        |                          | WA 砥石 : 1700 m/min<br>SN 砥石 : 1800 m/min<br>CBN ホイール : 1700 m/min,<br>3000 m/min  |
| 工作物送り速度      |                          | ダウンフィード ; 5 mm/min,<br>10 mm/min  |
| 研削油剤         |                          | エマルジョン MGF-3(1:20)<br>油剤供給量 ; 15 l/min  |
| 研削ノズル        |                          | 巻き付けノズル, 通常ノズル  |
| ドレッシング<br>条件 | ドレッサ<br>リード<br>切込み深<br>さ | 単石角錐形ダイヤモンドドレッサ<br>0.1mm/rev<br>WA 砥石及び SN 砥石 :<br>$\phi 20\mu\text{m} \times 2$ , $\phi 10\mu\text{m} \times 3$<br>CBN ホイール : $\phi 5\mu\text{m} \times 2$ |



(a) 詳細図



(b) 平面研削盤仕様の巻き付けノズル

図4.2 巻き付けノズル

### 4.3 巻き付けノズルによる研削点への油剤供給状態

研削油剤の巻き付け効果を確認するために、円筒研削盤を用いて研削点近傍で発生する圧力の測定を行っている<sup>(31)</sup>。

図4.3に、圧力測定の概略図を示す。圧力測定では、円筒測定物を用い、砥石と円筒物との距離を0.005mmとしている。通常ノズルで研削油剤を供給した際の発生圧力と巻き付けノズルの場合との比較結果を図4.4に示す。通常ノズルの場合、直径60mmの円筒測定物では、12kPa程度の圧力が見られたが、直径30mmの円筒測定物では、2kPa程度以下であり、ほとんど圧力が発生していない。一方、巻き付けノズルの場合、直径に関係なく、60kPa付近の圧力が見られ、通常ノズルと比べても発生する圧力差が大きい。この結果、工作物の直径が大きい場合、通常ノズルによる研削油剤の供給状態は、わずかな量の研削油剤が研削点に流入しているが、工作物直径が小さい場合、研削油剤はほとんど流入していないことが確認された。これに対して、巻き付けノズルでは、工作物の直径に、ほとんど関係なく、多量の研削油剤が研削点へ流入していることが確認されている。

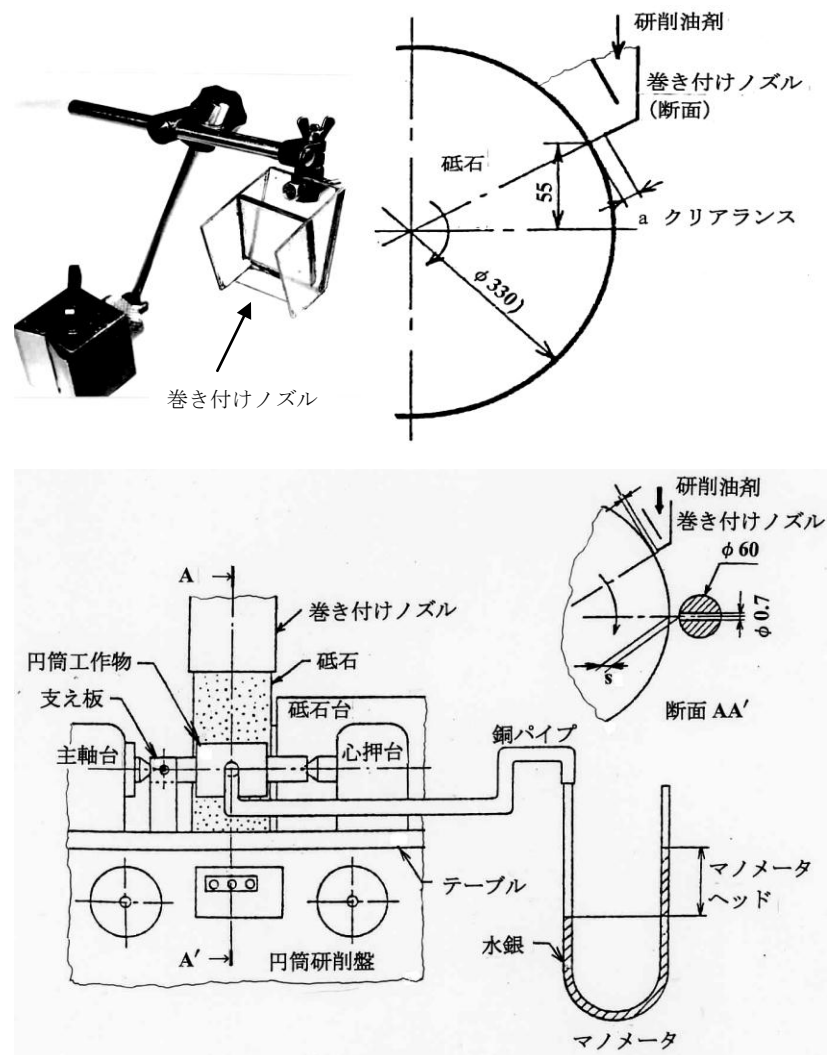


図4.3 圧力測定概略図

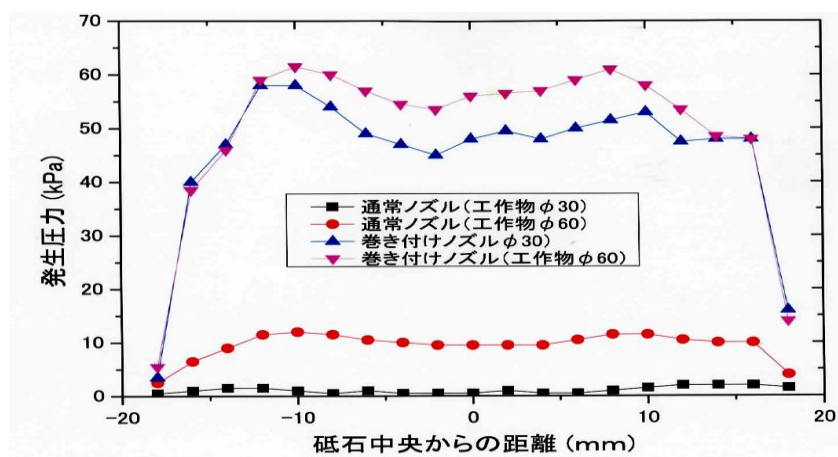
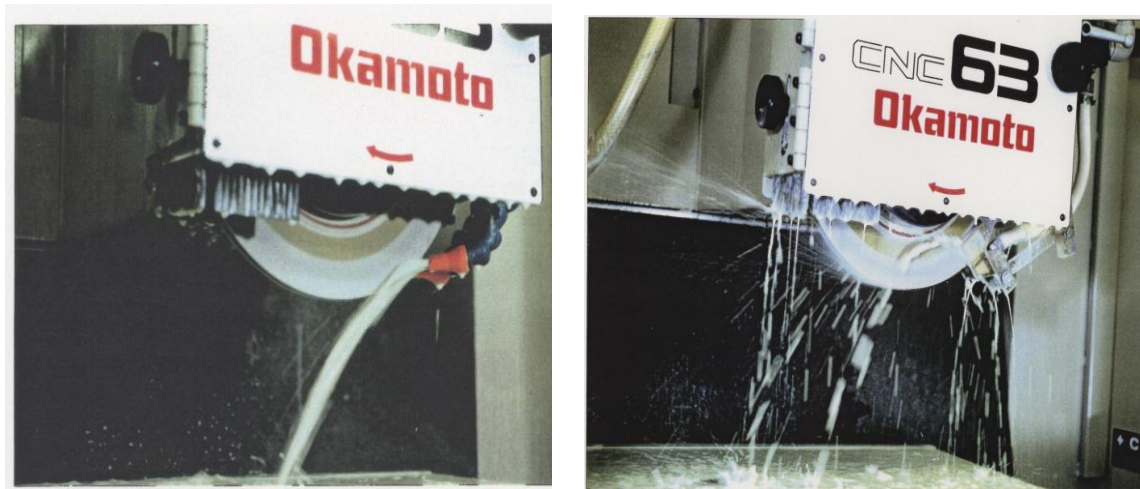


図4.4 研削油剤供給法と発生圧力



(a) 巻き付けノズル

(b) 通常ノズル

図4.5 研削油剤の供給状態

研削点温度の計測実験に用いた巻き付けノズルと通常ノズルによる研削油剤の供給状態を図4.5に示す。巻き付けノズルでは、研削点を超えても研削油剤の巻き付け状態が確認できるが、通常ノズルでは、研削点の手前で砥石表面から剥離し、研削点には、ほとんど到達していないことがわかる。

## 4.4 実験結果と考察

### 4.4.1 一般砥石研削における研削点温度

一般砥石として、よく使われているWA砥石を用いてダウンフィードを行った際の研削点温度を図4.6に示す。

ダウンフィード5 mm/minの場合、研削点温度は、69℃を示しているが、2倍の10mm/minで研削した場合、研削点温度は1318℃と飛躍的に上昇している。この理由は、能率が2倍になり、研削抵抗が増大することによって、砥粒切れ刃に負担がかかり、剪断作用時に生じる研削熱と切りくずが切れ刃すくい面を擦過する際に生じる摩擦熱によって、砥粒切れ刃に摩滅摩耗が生じ、研削熱が飛躍的に発生したものと予想される。ここで研削量として、研削体積を砥石幅と砥石の円周長さで割ったホイール(砥石)単位円周当たり研削代断面積を用いた理由は、砥石単位幅当たり、及び単位円周長さ当たりの研削量で比較すると、砥石幅及び砥石外径が異なる場合でも、研削条件が同じであれば、砥石径の大小および砥石幅にかか

ならず、砥石の性能を比較できるからである．これを裏付けるために、一般砥石の中でもWAより結晶純度が高く研削性能の優れるSN砥石で研削した際の研削温度を図4.7に、研削量に対する研削温度と研削動力の関係を図4.8に示す．SN砥石では、同じ研削点温度1300℃に到達するまでにWA砥石より1.5倍研削が可能であるといわれているが、WA砥石と同様、砥石単位円周長さ当たり研削代断面積が増加するに従って、研削動力が増え、研削点温度も高くなっていることがわかる．研削動力は研削抵抗に比例関係にあることから、砥石が摩滅摩耗し、研削抵抗に耐えきれずに脱落して自生発刃し、そのため見かけ上、切れ刃を回復しているが、研削動力の増加とともに研削点温度が急激に増大していることがわかる．

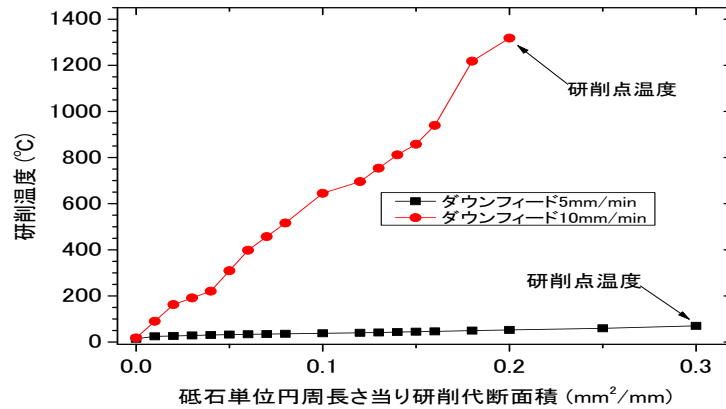


図4.6 WA砥石のダウンフィード速度が研削点温度に及ぼす影響

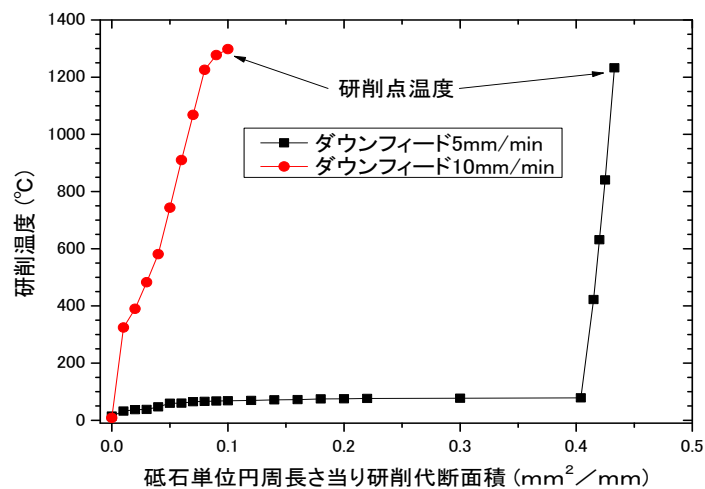


図4.7 SN砥石のダウンフィード速度が研削温度に及ぼす影響



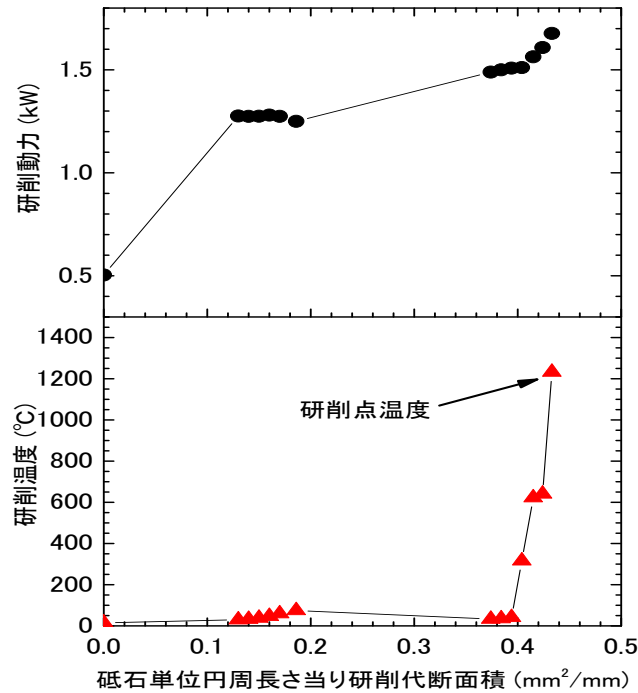


図4.8 SN砥石による研削点温度と研削動力

#### 4.4.2 CBNホイール研削における研削点温度

CBNホイールを用い、ダウンフィード5  $\text{mm}^2/\text{min}$ 及び10  $\text{mm}^2/\text{min}$ で研削した際の研削点温度を図4.9に示す. この図から分かるように, CBNホイール研削では, 研削点温度は低く送り速度に影響されない. 砥粒の形状がドレッシング後の形状を維持し, 砥粒切れ刃も鋭利な状態を維持しているため, ダウンフィード速度にかかわらず, 研削温度は上昇しにくいものと予想される.

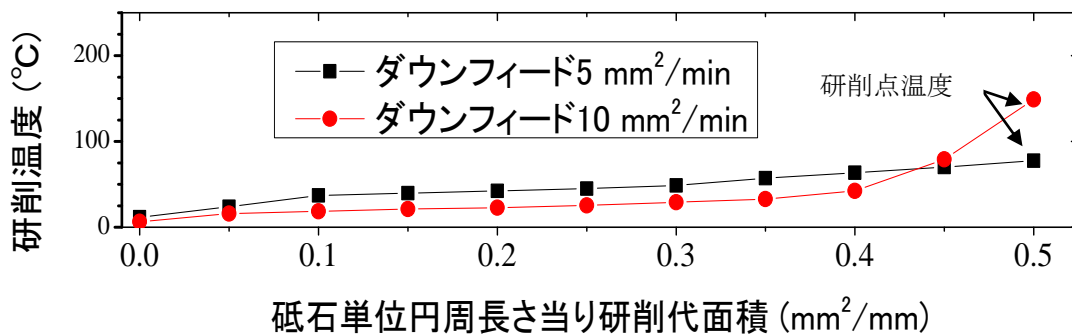


図4.9 CBNホイールのダウンフィード速度が研削点温度に及ぼす影響



#### 4.4.3 一般砥石とCBNホイールにおける研削点温度の比較

一般砥石のWA砥石と超砥粒ホイールのCBNホイールの研削温度を比較するために、ダウンフィード10mm/minで研削した際の2つの研削温度測定結果を図4.10に示す。この図からWA砥石の1318℃に対し、CBNホイールでは93.6℃と比較にならないほど低く、約1220℃もの温度差が生じていることがわかる。このことから、CBNホイールでは研削点温度による砥粒切れ刃へのダメージが少なく、ホイール寿命も一般砥石の500倍～1000倍も持続する理由が裏付けられる。

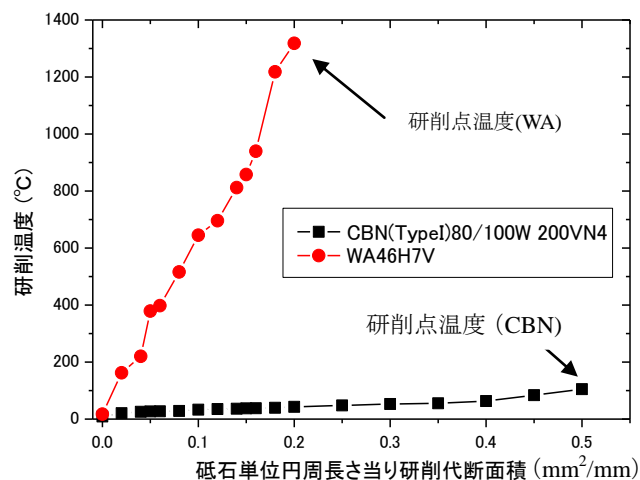


図4.10 WA砥石とCBNホイールの研削点温度の比較

#### 4.4.4 ホイール周速度に対する研削点温度

CBNホイール研削において、ホイール周速度の影響を検討するために、周速度1700m/minと3000m/minで研削した際の研削温度と研削動力の関係を図4.11に示す。この図から分かるように、研削動力は周速度の違いにより0.15kW程度の差があるものの安定状態を保持している。わずかであるが、研削量が増加するにつれ、ドレッシング時にダメージを受けた砥粒が脱落し、研削に寄与している砥粒数が徐々に減ったものと考えられる。一方、研削温度はわずかではあるが、周速度の影響を受け、研削点温度に20℃程度の差が生じている。ホイール周速度が増加することによって生じる摩擦抵抗が、砥粒1ヶ当たりの切り込み深さの影響を上まわっていると考えられる。

しかし、このような概念からはCBNホイールの性能の高さを知ることができるが、火花実験には温度上昇を伴わなければならないため、利用しにくいと考えられる。

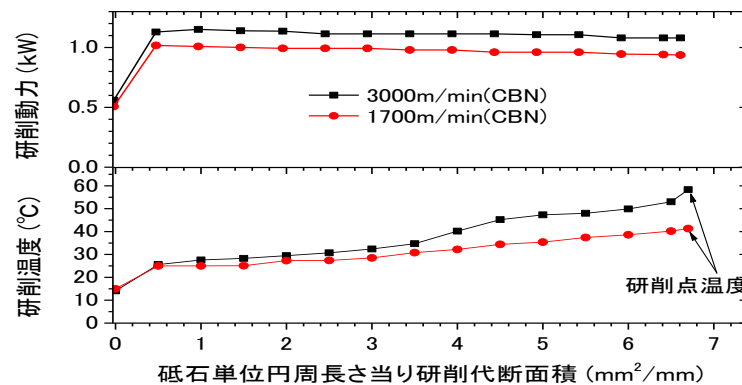


図4.11 CBNホイール周速度に対する研削温度と研削動力の差

#### 4.4.5 研削量に対する研削抵抗及び研削点温度の影響

ここでは、SN砥石およびCBNホイールについて、研削量に対する接線研削抵抗及び研削点温度の影響を検討している。

実験結果を図4.12に示す。この図において、接線研削抵抗に注目すると、SN砥石では、砥石摩耗がダウンフィード速度の影響を受け、摩滅状態によって抵抗値は大きく影響を受けるが、CBNホイールでは、砥粒切れ刃摩耗がダウンフィード速度の影響をほとんど受けずに鋭利な切れ刃を維持しているため、研削抵抗もSN砥石より低いことがわかる。研削温度についても、SN砥石、CBNホイールともに、砥粒切れ刃がドレッシング直後の鋭利な状態を維持している間、 $100^{\circ}\text{C}$ 以下であり、大差はないが、熱影響を受けやすいSN砥石では、砥粒切れ刃が磨滅して切れ刃が鈍くなると、研削温度が急激に上昇し、研削点温度が $1232^{\circ}\text{C}$ に達していることがわかる。このことは研削仕上げ面粗さにも影響しており、表面粗さによる砥石寿命 $3.2\mu\text{mRz}$ に対し、研削量 $0.4\text{mm}^2/\text{mm}$ 付近で急激に上昇し、寿命になっている。

一方、CBNホイールでは、ドレッシング直後の鋭利な砥粒切れ刃状態を維持しており、熱伝導率もSN砥粒の $0.126\text{kW}/\text{m}\cdot\text{K}$ に対して、 $1.3\text{kW}/\text{m}\cdot\text{K}$ と約10倍も良いため、砥粒に研削熱が滞留することなく拡散冷却されるため、 $50^{\circ}\text{C}$ 前後の研削点温度状態のまま研削し続けていることがわかる。このため研削仕上げ面粗さは、初期の仕上げ面粗さを保持したまま、研削し続けていることが示されている。

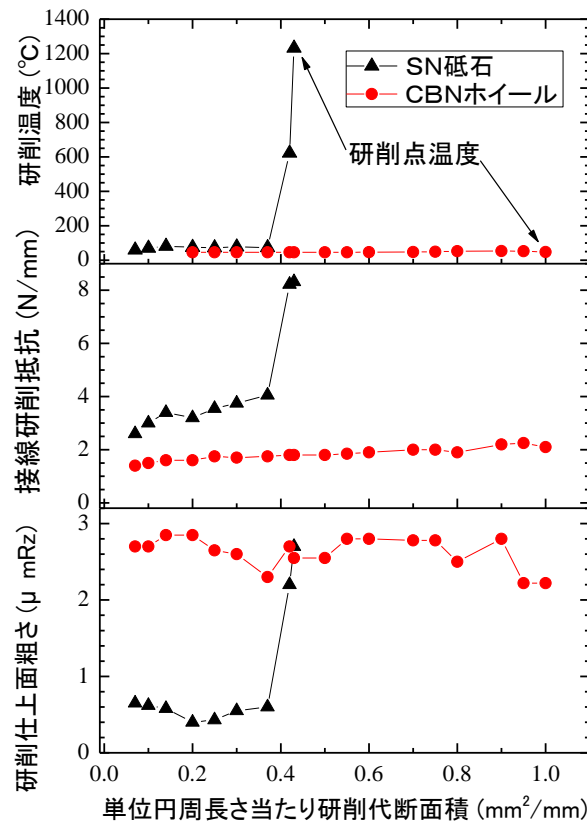


図4.12 SN砥石とCBNホイールの研削点温度及び研削性能の比較

#### 4.4.6 研削油剤の種類に対するCBNホイール研削の研削点温度

研削油剤の種類が研削点温度に及ぼす影響について、実験確認を行った結果を図4.13に示す。研削油剤供給方法は巻付けノズルとし、代表的な研削油剤として冷却性の強いケミカルソリューションタイプのシンタロイDC81、及び潤滑性のあるエマルジョンタイプのMFG-3を用いた。図4.13は、工作物SCM435 (HRC 48)をCBNホイールによるダウンフィード速度10mm/minで研削した場合の研削点温度を示しており、冷却性の良いシンタロイDC81では、93.6°Cであるのに対し、MFG-3では、564°Cと高く、研削条件の厳しいダウンフィード研削では、潤滑性よりも冷却性のよい研削油剤が研削点温度に対して良好な結果を及ぼすことがわかる。ただし、研削途中で現れた研削温度の変曲点の原因説明は未だできていない。今後の課題であると考えている。

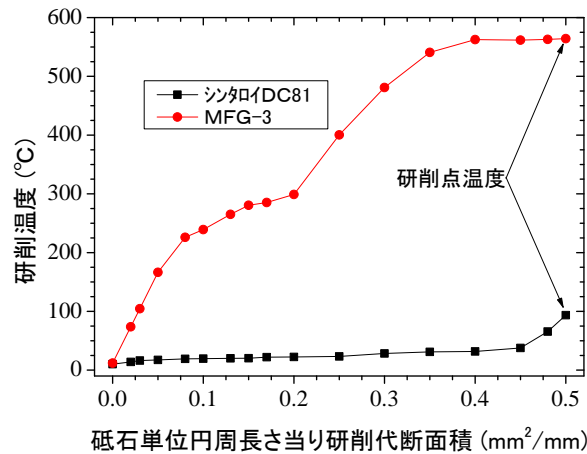


図4.13 研削油剤の種類がCBNホイールの研削点温度に及ぼす影響

#### 4.4.7 研削油剤供給法が研削点温度に及ぼす影響

ここでは、研削油剤供給状態が研削点温度に及ぼす影響について検討する。

一般に使用されている通常ノズルと巻き付けノズルの2つの例を取上げ、SCM435(HRC48)をCBNホイールで研削した場合の研削点温度を図4.14に示す。通常ノズルと巻き付けノズルについては、図4.4及び図4.5に示したように、圧力発生状態から研削供給効果に明らかな違いが現れていたが、研削点温度にも著しい効果が現れている。すなわち、巻き付けノズルでは、研削点温度が93.6°Cと100°C以下となっており、CBNホイールの優れた熱伝導性と巻き付けノズルによる研削油剤の冷却効果が発揮されている。通常ノズルでは、CBNホイールといえども684°Cとなっており、巻き付けノズルの場合のその7倍も高く、研削点に研削油剤が供給されていないために、研削点での冷却が十分行われていないことがわかる。

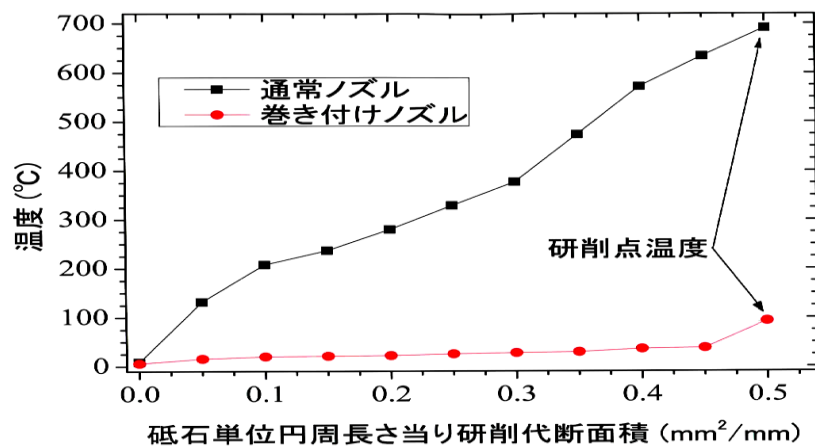


図4.14 研削油剤供給法が研削点温度に及ぼす影響

## 4.5 おわりに

研削加工中の研削点温度の測定結果より、CBNホイールと一般砥石との間に次のような大きな違いのあることが明らかとなった。

(1) CBNホイール及び一般砥石は、ダウンフィード5mm/minと通常の能率の場合、研削点温度は低い温度状態で研削が行われる。能率を2倍の10mm/minに上げて研削した場合、CBNホイールでは、研削点温度はわずかに上昇するだけであるが、一般砥石では、摩滅摩耗により、研削点温度は融点近くまで上昇した。

(2) CBNホイール研削の場合、研削点温度は、周速度の影響をわずかにだけ受けて高くなる。

(3) SN砥石およびCBNホイール研削の接線研削抵抗及び研削点温度について、SN砥石では、砥粒切れ刃の磨滅摩耗により、砥石単位円周長さ当たり研削代面積、すなわち研削量の増加とともに、研削抵抗は大きくなり、研削点温度も融点近くまでに達する。一方、CBNホイールでは、ドレッシング直後の鋭利な砥粒切れ刃状態を維持しており、熱伝導率もSN砥粒より約10倍程度良いため、50℃前後の研削点温度状態のまま研削し続けられることがわかった。

(4) 研削点温度から、巻き付けノズルによる研削油剤供給法では、研削油剤が研削点に到達し、冷却に十分寄与していることがわかった。

以上より、砥石の種類、ダウンフィード速度、研削油剤の種類、及び研削油剤の供給法の違いにより、研削点温度に著しい差が生じることが分かった。

火花実験で用いた砥石は、一般砥石A36N7V4Tであり、研削条件としては、過酷な乾式研削であるため、研削点温度は少なくとも湿式研削実験下で得られた1318℃をはるかに超えていると考えられる。鉄の融点は、1530℃であるが、鋼材の柔らかくなる温度は1400℃近傍であるといわれ、この温度以上であれば、WA及びSNなどの一般砥石でも火花試験、SEMによるファイアボールの観察実験に適用できると考えられる。

一方、CBNホイールでは、接線研削抵抗及び研削点温度など、研削性能が良好なため、火花試験、SEMによるファイアボール観察実験には適用できないことが明らかになった。

## 第5章 ファイアボールによる鋼種推定手順

### 5.1 はじめに

鋼種を現場で簡便に、速く、低コストで比較的正確に判別ならびに推定できる方法として JIS 規格による「鋼の火花試験方法」があり、試験方法、火花特性の詳細な記述とともに得られた結果をもとに鋼種の推定手順も記述されている。

本章では、SEM 観察によるファイアボールの特徴を鋼種推定の手順の中を含めることについて提案している。

### 5.2 ファイアボールの特性を利用した鋼種推定手順

規格に示されている火花試験方法による鋼種推定の手順は以下のように進められる。

- (1) 「炭素破裂の有無」により、炭素鋼と合金鋼を大別する。ここで合金鋼は低合金鋼の群と高合金鋼の群に分けている。
- (2) 合金元素の有無を調べ、炭素鋼か低合金鋼であるかを推定する。0.5%C 以下ならば Ni, Cr, Si, Mn, Mo などが含まれている。0.5%C を超えるものである場合、前記した元素のほかに W, V などが含まれていることがある。
- (3) 低合金鋼ならば、合金元素の特徴を観察して、その種類と量から鋼種を推定する。

高合金鋼には Ni, Cr, Mo, W, V, Co などが含まれているため、火花の特徴により、合金元素の種類と量を観察して鋼種を推定する。

SEM 観察により得られたファイアボールの特徴としては、ファイアボールの大きさ、形状、表面性状、ファイアボールの破裂と表面にできた破裂による穴の大きさ、穴の数がある。火花の場合と同様に炭素鋼と合金鋼についてはファイアボールの大きさによって区別でき、合金鋼に含まれる元素についてもファイアボールに特徴が現れる。

表 5.1~表 5.3 にファイアボールの特性を考慮した鋼種推定手順を述べている。

表 5.1 ファイアボールの特性を考慮しての鋼種推定手順表(1)

| 火花観察                 | ファイアボール  |  |            |                       |        |                | 推定鋼種<br>材料 |
|----------------------|--|--|------------|-----------------------|--------|----------------|------------|
|                      | 大きさ  | 大きさによる分類   | 形状         | 表面性状                  | 穴の大きさ  | 穴の数            |            |
| 3本破裂,<br>4本破裂        | 平均値<br>約 120 $\mu$ m                                     | 炭素鋼<br><br>比較的小<br>(150 $\mu$ m<br>$\pm$ 50 $\mu$ m) | 真球         | 筋, 微少層<br>状表面         | 小      | 無し<br>又は<br>1つ | S10C       |
| 3本破裂<br>2段咲          | 平均値<br>約 140 $\mu$ m                                     |  |            | 筋, 亀甲模<br>様           |        |                | S20C       |
| 数本破裂<br>2段咲          | 平均値<br>約 140 $\mu$ m                                     |  |            |                       |        |                | S30C       |
| 数本破裂<br>3段咲          | 平均値<br>約 140 $\mu$ m                                     |  |            |                       |        |                | S40C       |
| 数本破裂<br>3段咲き<br>花粉付き | 平均値<br>約 150 $\mu$ m<br>(先端部で<br>50 $\mu$ m程度<br>のものがある) |  | ↓<br>歪 (大) | ↓<br>筋, 亀甲模<br>様 (顕著) | ↓<br>大 | ↓<br>数個        | S50C       |

表 5.2 ファイアボールの特性を考慮しての鋼種推定手順表(2)

| 火花観察                    | ファイアボール              |  |                     |                             |           |                | 推定鋼種    |
|-------------------------|----------------------|--|---------------------|-----------------------------|-----------|----------------|---------|
| 炭素破裂                    | 大きさ                  | 大きさに<br>よる分類   | 形状                  | 表面性状                        | 穴の<br>大きさ | 穴の<br>数        | 材料      |
| 菊状花,<br>3本破裂<br>2段咲     | 平均値<br>約 230 $\mu$ m | 合金鋼<br><br>比較的大<br>(250 $\mu$ m<br>$\pm$ 50 $\mu$ m) | 歪                   | 筋, 荒れた表<br>面, 多数穴の<br>ものは歪大 | 大小        | 複数<br>又は<br>多数 | SCr420  |
| 菊状花,<br>数本破裂<br>3段咲     | 平均値<br>約 230 $\mu$ m |  | 歪                   | 筋, 荒れた表<br>面, 多数穴の<br>ものは歪大 | 大小        | 複数<br>又は<br>多数 | SCr440  |
| ふくれ<br>せん光,<br>分裂剣花     | 平均値<br>約 250 $\mu$ m |  | ほぼ<br>球状            | 筋, 亀の子模<br>様                | 大         | 1つ             | SNC415  |
| ふくれ<br>せん光,<br>分裂剣花     | 平均値<br>約 250 $\mu$ m |  | 歪                   | 筋, 荒れた表<br>面                | 小         | 複数             | SNC631  |
| 槍先                      | 平均値<br>約 220 $\mu$ m |  | ほぼ<br>球状            | 筋, 滑らか                      | 大小        | 複数             | SCM415  |
| 槍先                      | 平均値<br>約 230 $\mu$ m |  | 歪                   | 筋, 滑らか                      | 大         | 複数             | SCM440  |
| 槍先<br>ふくれ<br>せん光<br>菊状花 | 平均値<br>約 250 $\mu$ m |  | ほぼ<br>球状<br>又は<br>歪 | 筋, 滑らか                      | 大小        | 複数             | SNCM420 |
| 槍先<br>ふくれ<br>せん光<br>菊状花 | 平均値<br>約 300 $\mu$ m |  | 歪                   | 筋, 荒れた表<br>面                | 小         | 1つ<br>又は<br>複数 | SNCM447 |



表 5.3 ファイアボールの特性を考慮しての鋼種推定手順表(3)

| 火花観察         | ファイアボール  |                                     |                 |                 |            |       | 推定鋼種  |
|--------------|--|-------------------------------------|-----------------|-----------------|------------|-------|-------|
|              | 大きさ  | 大きさによる分類                            | 形状              | 表面性状            | 穴の大きさ      | 穴の数   | 材料    |
| 小さく数多い星状破裂   | 比較的小<br>( $150\mu\text{m}$<br>$\pm 30\mu\text{m}$ )          | 工具鋼<br><br>ばらつきが大きい<br>ため個別に比べて推定する | 穴無は真球<br>穴付きは歪  | 粗い表面            | 穴無, 又は比較的大 | 無又は数個 | SK5   |
| 烈花多し, 白ひげつき槍 | 比較的大<br>( $150\mu\text{m}$<br>$\pm 30\mu\text{m}$ )          |                                     | 穴無は真球<br>穴付きも球形 | 粗い表面<br>または亀の子状 | 穴無, 又は比較的大 | 無又は数個 | SK3   |
| 白ひげつき槍       | 比較的大<br>( $200\mu\text{m}$<br>$\pm 50\mu\text{m}$ )          |                                     | 歪               | 著しく荒れた表面        | 小          | 複数    | SKS4  |
| 白ひげつき槍       | 比較的大<br>( $200\mu\text{m}$<br>$\pm 20\mu\text{m}$ )          |                                     | 歪               | 著しく荒れた表面        | 大          | 複数    | SKS2  |
| 白ひげつき槍       | 比較的大<br>( $200\mu\text{m}$<br>$\pm 50\mu\text{m}$ )<br>小も混じる |                                     | ほぼ球<br>又は歪      | 著しく荒れた表面        | 大小         | 複数    | SKD4  |
| 先端ふくれ花付き     | 比較的大<br>( $200\mu\text{m}$<br>$\pm 50\mu\text{m}$ )          |                                     | ほぼ球             | 粗い層状表面          | 小          | 複数    | SKD61 |
| ふくれせん光, 分裂剣花 | 比較的大<br>( $150\mu\text{m}$<br>$\pm 30\mu\text{m}$ )          |                                     | ほぼ球<br>又は歪      | 荒れた表面           | 小          | 無又は数個 | SKT4  |

### 5.3 おわりに

SEM 観察によるファイアボールの特徴を鋼種推定の手順の中に含めることにより，炭素鋼と合金鋼の区別については，ファイアボールの大きさにより推定できる．さらに，ファイボールの形状，表面性状，大きさ，穴の数に特徴が明確に現れることを利用し，合金鋼に含まれる元素について，ファイアボールを考慮した鋼種推定手順を提案した．

## 第6章 結 言

本研究では、鋼材の判別について、JIS に規定されている火花試験方法に加えて、未熟練者でも容易に鑑別しやすくするために、高速度 CCD カメラとパソコンを利用して画像を分析し、熟練者の肉眼観察に匹敵する鑑別方法を見出した。また研削下で生じるファイアボール形状と機械材料の関係について、含有元素により特徴づけられるファイアボールの定性的な変化から材料鑑別が可能になり、従来の方法と組合せることにより、より詳細な鋼種鑑別が可能となることを明らかにした。

第1章では、研究の背景として、現代の高度文明社会において、一步誤った鋼材を使用すると、人命を伴う深刻な破損事故につながりかねない鋼材の使用状況を取り上げ、鋼材の鑑別の重要性を述べ、本研究の目的および意義、論文の構成について述べた。

第2章では、高速度 CCD カメラを用いた火花画像をパーソナルコンピュータで画像解析し、高速度 CCD カメラとデジタルカメラを用いた二つの実験方法から、火花と鋼の化学成分の関係について検討し、以下の傾向を確認した。

(1) 従来の火花試験で判明し難い鋼種鑑別も、高速度 CCD カメラを利用した鋼種判定システムを構築することによって画像を1枚ずつ、及び複数枚重ねることにより火花形状の変化を検討でき、鋼種判定に利用できる。

(2) JIS 火花試験条件において、高速度 CCD カメラによる撮影画像を5枚程度重ね合わせることで、通常デジタルカメラのシャッタースピードを ISO 感度 100 で 1/40 秒程度にセットすることで熟練技術者による肉眼観察と同じ条件が見いだされ、未熟練者でも判別可能になる。

(3) 鋼種判別に、流線の任意断面通過数、流線速度などを測定することにより、定性的な変化を調べることができ、材料判別に利用可能となる。

(4) ビデオカメラで撮影した火花画像の RGB 色別ヒストグラムより、RGB 値を定量化すれば、流線の色の違いによる鋼種判別に利用可能となる。

また炭素鋼では、計測ライン上を通過する火花流線の強度及び個数をカウントし、炭素含有量が増加するに従い、増大することを見出し、この特性を用いて鋼種判別に利用できることを述べた。JIS G 0566 で規定されている鋼の火花試験について、専門の熟練者が簡単にはできないような鋼種判別について、高速度 CCD カメラを使用して撮像した研削火花の形状を用いて未熟練技術者にも鋼材の判別が可能な方法を提案した。短時間に連続撮影した研削火花画像をコンピュータで解析し、最適な画像の重ね合わせにより、熟練者が肉眼で観察して鑑定し

たものとまったく同じ火花流線を再現する効果を見出した。

第3章では、SEMによるファイアボールの撮影結果から、その特性を明らかにし、含まれる元素の性質とファイアボール形状との関係を実験的に明らかにした。火花試験という簡便な方法から得られるファイアボールを用いているが、いくつか特徴的な性質が得られた。鋼種鑑別の観点から、次に示す特徴的な変化をもとに鋼種推定の可能性を示した。

- (1) ニッケルが含まれている場合には、薄片層状の表面性状を示し、穴があきにくい。
- (2) クロムが多く含まれている鉄鋼材料では、ファイアボールが大きくなり、破裂したファイアボールに多くの穴があき、表面には、筋が現れる。ファイアボールの形状としては真球が多く、延性的な性質が現れる。
- (3) モリブデンが含まれている鋼材のファイアボール表面は、滑らかとなる。
- (4) タングステンが含まれている鋼材のファイアボールは、表面が皺状となり、多くの穴があく。

以上のように、ファイアボールの定性的な変化から材料鑑別が可能な鋼材ならびに添加元素の種類の解析が可能であり、従来の方法と組み合わせることにより、鋼種鑑別の一つの方法として利用できることを示した。

第4章では、研削加工中の研削点温度の測定結果より、CBNホイールと一般砥石との間に次のような大きな違いを明らかにした。

(1) CBNホイール及び一般砥石は、ダウンフィード5mm/minと通常能率の場合、研削点温度は低い温度状態で研削が行われる。能率を2倍の10mm/minに上げて研削した場合、CBNホイールでは、研削点温度は、わずかに上昇するだけであるが、一般砥石では、磨滅摩耗により、研削点温度は融点近くまでに上昇する。

(2) CBNホイール研削の場合、研削点温度は、周速度の影響をわずかだけ受けて高くなる。

(3) SN砥石およびCBNホイール研削の接線研削抵抗および研削点温度について、SN砥石では、砥粒切れ刃の磨滅摩耗の影響により、ダウンフィード速度とともに、研削抵抗は大きくなり、研削点温度も融点近くまで達する。一方、CBNホイールでは、レッシング直後の鋭利な砥粒切れ刃状態を維持しており、熱伝導率もSN砥粒より約10倍程度良いため、砥粒に研削熱が滞留することなく50℃前後の研削点温度状態のまま研削し続ける。

(4) 研削点温度から、巻き付けノズルによる研削油剤供給法では、研削油剤が研削点に到達し、冷却に十分寄与する。

以上より、砥石の種類、ダウンフィード速度、研削油剤の種類、及び研削油剤

の供給法の違いによって、研削点温度に著しい差が生じることが分かった。

火花実験で用いた砥石は、一般砥石A36N7V4Tであり、研削条件としては、過酷な乾式研削であるため、研削点温度は、少なくとも湿式研削実験下で得られた1318℃をはるかに超えていると考えられる。鉄の融点は1530℃であるが、鋼材の軟化する温度は1400℃近傍であるといわれ、この温度以上であれば、WA及びSNなどの一般砥石でも火花試験、SEMによるファイアボールの観察実験に適用できる。

一方、超砥粒として注目されているCBN砥粒が一般砥粒に比べて極度に長寿命である理由を研削点温度の立場から検討した結果、鋭利な砥粒切れ刃を長く持続し、ファイアボールの生成には低すぎる研削点温度であるため、火花試験には不適であることを明らかにした。

第5章では、鋼種推定手順をまとめ、提案した。

第6章では、本論文の総まとめを行った。

## 謝 辞

本研究の遂行にあたり，研究及び実験のご指導並びに主査として始終懇切なご指導とご鞭撻を賜りました明治大学教授 小泉忠由博士に深く御礼申し上げます。また，ご多忙中にも拘わらず副査を担当して頂きました明治大学教授 加藤和夫博士及び明治大学教授 石原康利博士におかれましては，貴重なご意見とご教示を頂き，心から厚くお礼申し上げます。また，東京工業大学大学院教授 齋藤義夫博士には，ご多忙中にも拘わらず外部審査員として，副査を快諾して頂いた上に，貴重なご意見とご教示を賜り，心から厚く御礼申し上げます。また，故明治大学名誉教授 横川和彦博士及び明治大学教授 谷内 聖博士には，研究及び実験のご指導を頂き，厚く御礼申し上げます。さらに，実験に協力頂いた東京都立大学（現首都大学）故横川宗彦博士，明治大学大学院生の常盤 匡氏，中嶋俊介氏，日比啓太郎氏，佐久間直己氏，向井良平氏，細谷修一郎氏，星 隆之氏，学部生の三島和孝氏，伊東祐次氏，蛭名悟志氏，伊藤 暁氏，大坪晴夫氏，宮坂光洋氏ほか，学生諸氏に厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

- (1) 桶谷繁雄，金属材料簡易鑑別法，大雅堂(1955), pp.1-2
- (2) 日本規格協会, JIS G 0566-1980 鋼の火花試験法, pp.1-32
- (3) 田辺実，小泉忠由，高速度CCDカメラを用いた火花画像とファイアボールのSEM観察を併用した鋼種判別に関する研究, 砥粒加工学会誌, Vol.45, No.1, 砥粒加工学会(2001), pp.40-45
- (4) 中嶋俊介，小泉忠由，火花試験を用いた炭素鋼の材料特性の検討と材料判別，日本機械学会沖縄講演会論文集，No.078-2，日本機械学会九州支部(2007)，pp.193-194
- (5) 伊藤彰伸，小泉忠由，火花試験を用いた炭素鋼の特性評価，日本機械学会北海道支部第 48 回講演会講演概要集，No.612，日本機械学会北海道支部(2009)，pp.197-198
- (6) N.バークス，G .H. マイヤ著，西田恵三，成田敏夫共訳，金属の高温酸化入門，丸善(1990b), p.78, p148
- (7) 日本金属学会編，金属データブック，改定 3 版，丸善 (1993a), p.31, p.127,

p.165.

- (8) 日本金属学会編, 金属データブック, 改訂3 版, 丸善(1993b), p.197.
- (9) J.M.ウェスト著, 柴田俊夫訳, 腐食と酸化, 産業図書(1990), p.157.
- (10) 日本金属学会編, 金属便覧, 丸善(2000a), p.602.
- (11) 腐食防食協会編, 金属材料の高温酸化と高温腐食, 丸善(1982a), p.109.
- (12) 腐食防食協会編, 金属材料の高温酸化と高温腐食, 丸善(1982b), p. 81.
- (13) 斉藤安俊, 阿竹徹, 丸山俊夫 編訳, 金属の高温酸化, 内田老鶴圃(1986), p.112.
- (14) N.バークス, G.H. マイヤ著, 西田恵三, 成田敏夫共訳, 金属の高温酸化入門, 丸善(1990b), p.127.
- (15) 小原嗣朗, 金属組織学概論, 朝倉書店(1996a), p. 149.
- (16) 日本鉄鋼協会編, 鉄鋼便覧 I 基礎, 第 3 版, 丸善(1981), p.14-15.
- (17) 小原嗣朗, 金属組織学概論, 朝倉書店(1996b), p.145.
- (18) N.バークス, G.H. マイヤ著, 西田恵三, 成田敏夫共訳, 金属の高温酸化入門, 丸善(1990c), p. 24.
- (19) N.バークス, G.H. マイヤ著, 西田恵三, 成田敏夫共訳, 金属の高温酸化入門, 丸善(1990d), p.6.
- (20) 友野理平, 腐食・防食用語事典, オーム社(1980), p.114.
- (21) 北田正弘, 初級金属学, アグネ(1984a), p.215.
- (22) 武田実佳子, 鉄鋼材料製造過程に生成するスケールの性状と高温物性に関する研究, 大阪大学大学院工学研究科博士論文, p.76-77
- (23) 武田実佳子, 鉄鋼材料製造過程に生成するスケールの性状と高温物性に関する研究, 大阪大学大学院工学研究科博士論文, p.78-79
- (24) N.バークス, G.H. マイヤ著, 西田恵三, 成田敏夫共訳, 金属の高温酸化入門, 丸善(1990e), p.117.
- (25) 腐食防食協会編, 金属材料の高温酸化と高温腐食 (1982c), p.29.
- (26) 日本金属学会編, 金属データブック, 改訂 3 版 (1993b), p.197.
- (27) 日本金属学会編, 金属便覧, 丸善(2000b), p.605.
- (28) 安井平司, 湿式研削における焼け発生温度, 精密工学会誌, 56, 3(1990), pp. 99-104
- (29) 横川和彦, 横川宗彦, 研削加工の進め方, 工業調査会(1998), pp.30-112
- (30) 横川和彦, 横川宗彦, 研削加工の進め方, 工業調査会(1998), p.209
- (31) 横川和彦, 谷内聖, 田辺実, 向井良平, 伊藤暁, 大坪晴夫, 研削油剤供給法とその研削性能に及ぼす影響(第 2 報) 精機学会秋季大会学術講演論文集 (1980), pp.428-429

## 関連発表論文

### (1) 学術論文

- 1) 田辺実, 常盤 匡, 小泉忠由, 研削下で生じるファイアボール形状と機械材料との関係, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.817(2014), pp.1-16
- 2) 田辺実, 小泉忠由, 高速度 CCD カメラを用いた火花画像とファイアボールの SEM 観察を併用した鋼種判別に関する研究, 砥粒加工学会誌, Vol.45, No.1, 砥粒加工学会(2001), pp.40-45
- 3) M TANABE, K Yokogawa, Improvements in Integrity by CBN Wheel Grinding, Proceedings of the International Conference on LEM 21, JSME(2003.Nov.), No. 03-203, pp.291-296

### (2) 口頭発表

- 1) 田辺実, 常盤 匡, 小泉忠由, 研削下で生じるファイアボール形状と機械材料の関係, 日本機械学会第 24 回設計工学・システム部門講演会講演論文集, 2418 [2014.9.17-19, 徳島] (2014), pp.1-8
- 2) 常盤匡, 田辺実, 小泉忠由, SEM を用いた合金鋼のファイアボールの観察と火花特性, 日本機械学会福岡講演会講演論文集 128-3[2009.9.29 福岡](2009), pp. 53-54
- 3) 田辺実, 小泉忠由, 日比啓太郎, 高速度 CCD カメラを用いた炭素鋼の火花特性に関する研究, 日本機械学会講演論文集, No.045-2(1), ('04-11, 中国四国支部・九州支部合同企画山口地方講演会), pp.239-240
- 4) 横川和彦, 田辺実, 蛭名悟志, 宮坂光洋, 細谷修一郎, 巻き付けノズルによる研削油剤供給効果と研削熱, 精密工学会(1996 年 3 月), pp.951-952
- 5) 横川和彦, 田辺実, 蛭名悟志, 細谷修一郎, 宮坂光洋, 平面研削における巻き付けノズルの効果の研究, 精密工学会(1995 年 9 月), pp.391-392
- 6) 横川和彦, 田辺実, 星 隆之, 蛭田 均, 佐藤貴史, CBN ホイールと在来砥石による研削温度, 精密工学会(1994 年 3 月), pp.95-96
- 7) 横川和彦, 田辺実, 樋口正敏, 山本隆一, 研削油剤が研削加工中の砥粒破砕に及ぼす影響, 砥粒加工学会講演論文集 (1991), pp.335-340
- 8) 横川和彦, 谷内聖, 田辺実, 向井良平, 伊藤暁, 大坪晴夫, 研削油剤供給法とその研削性能に及ぼす影響(第 3 報), 精機学会春季大会学術講演論文集 (1981), pp.847-848
- 9) 横川和彦, 谷内聖, 田辺実, 向井良平, 伊藤暁, 大坪晴夫, 研削油剤供給



法とその研削性能に及ぼす影響(第2報), 精機学会秋季大会学術講演論文集, (1980), pp.428-429

- 10) 横川和彦, 谷内聖, 田辺実, 向井良平, 三井嘉一郎, 研削油剤供給法とその研削性能に及ぼす影響, 精機学会春季大会学術講演論文集(1980), pp.128-129